



SIIRRETTÄVÄN KOLMIVAIHEISEN MAGNETOIVAN AGGREGAATIN KÄYTTÖTURVALLISUUDEN TUTKIMINEN

Jonne Virtanen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Sähkötekniikan
koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

VIRTANEN, JONNE

Siirrettävän kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin käyttöturvallisuuden tutkiminen

Opinnäytetyö 133 sivua, liitteitä 77 sivua
Huhtikuu 2014

Tähän opinnäytetyöhön liittyvät mittaukset ovat osa varavoima-hanketta, jonka yhtenä tutkimusosapuolena Tampereen ammattikorkeakoulu toimi. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin tutkimaan kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin käyttöturvallisuutta. Syy aggregaatin käyttöturvallisuuden tutkimiseen oli syntynyt viime vuosina Suomea riepotelleista myrskyistä, jotka ovat aiheuttaneet laajoja sähkökatkoja. Myrskyjen seurauksena kotitaloudet ovat hankkineet varavoimakoneita varmistaakseen sähkönsaannin myös sähkökatkojen aikana. Kaupat ja marketit ovat myös havainneet kotitalouksien tarpeet hankkia varavoimakone ja alkaneet myydä monenkokoisia, hintaisia- sekä laatu-isiä varavoimakoneita. Kuluttajat ovat yleensä kiinnostuneita edullisista tuotteista, eivätkä edullinen hinta ja laatu tunnetusti välttämättä kulje käsi kädessä. On siis todettava, että ostettaessa edullinen varavoimalaite saatetaan tulla ostaneeksi myös hengenvaarallinen laite. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä tutkittiin halvemman hintaluokan Stanley SG5500 -aggregaatin käyttöturvallisuutta.

Työssä tutkittiin kuormittamattoman ja kuormitetun aggregaatin tuottaman sähkön laatua ja sen heikkenemisestä mahdollisesti syntyviä käyttöturvallisuusriskejä. Varavoimakonetta kuormitettiin niin symmetrisillä kuin epäsymmetrisillä kuormilla. Varavoimakoneen käyttäytymistä tutkittiin myös kuormitusmuutoksissa, joissa koneeseen kytetään äkillisesti erityyppisiä kuormalaitteita, kuten kolmivaiheinen oikosulkumoottori, epälineaarinen kuorma tai yksivaiheinen uppopumppu. Kuormittamalla varavoimakonetta erisuuruisilla kolmivaiheisilla oikosulkumoottoreilla haluttiin myös tutkia varavoimakoneen mitoitus- eli sitä, minkä tehoisia oikosulkumoottoreita tutkitulla aggregaatilla voidaan käyttää. Mittausten viimeisessä osiossa tutkittiin varavoimakoneen syöttämän oikosulkuvirran suuruutta, jotta voitiin selvittää, riittääkö varavoimakoneen tuottama oikosulkuvirta laukaisemaan suojalaitteita.

Työn tuloksista havaittiin, että tyhjäkäynnissä ja symmetrisillä kuormituksilla varavoimakoneen tuottama sähkö täyttää standardin EN 50160 vaatimukset. Epäsymmetrisillä kuormilla kuitenkin havaittiin vaihejännitteen merkittävää kasvua vähemmän kuormiteissa tai kuormittamattomissa vaiheissa. Epäsymmetrian huomattiin myös vaikuttavan merkittävästi vaihejännitteen aaltomuotoihin. Tutkimuksissa havaittiin myös, että tutkitulla varavoimakoneella voidaan käyttää turvallisesti enintään 1,5 kW:n oikosulkumoottoreita, sillä kasvatettaessa moottorin tehoa 2,2 kW:iin huomattiin, että tietyllä kuormitustilanteella syntyy käyttöturvallisuusriski.

Asiasanat: käyttöturvallisuus, aggregaatti, varavoimakone

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

VIRTANEN, JONNE:

Study of Operational Safety of Movable 3-Phased Synchronized Aggregate

Bachelor's thesis 133 pages, appendices 77 pages
April 2014

The measurements which are related to this thesis are a part of the reserve power project where University of Applied Sciences were as one study. This thesis concentrates on studying operational safety of 3-phased synchronized aggregate. The reason for this study was developed from storms which have caused widespread power outages in Finland. As a result of these power outages households have acquired the reserve power machinery, to ensure the supply of electricity, also during a power outage. Stores and markets have also noticed the need of households to acquire a reserve power machine and have begun to sell them in many sizes, different prices and in varying quality. Consumers are usually interested in the low-priced products and the advantageous price and quality, as is well known they do not necessarily go hand in hand. When buying an advantageous reserve power machine, one may also come to buy a dangerous device. For this reason this thesis studied operational safety of Stanley SG5500 aggregate which belongs in lower price category.

In the work, the quality of the electricity produced by the aggregate and an operational safety risks which are possibly created from the weakening were studied with a loaded and not loaded aggregate. The reserve power machine was loaded with symmetrical and asymmetric loads. The reserve power machine was also studied with different types of loads which are suddenly connected to the machine such as a 3-phased short circuit motor and non-linear load and 1-phased water pump. By loading the reserve power machine with 3-phased short circuit motors of different sizes, one also wanted to study the dimensioning of the reserve power machine. In other words, how powerful motors can be used by a studied aggregate. In the last partition of the measurements the size of the short circuit current fed by the reserve power machine was studied so that one can clarify if the short circuit current produced by the reserve power machine is sufficient.

The results showed that in an idle running and with symmetrical load the electricity produced by the reserve power machine meets the demands of standard EN 50160. However, asymmetrical loads caused the significant growth of phase voltage at less loaded or unloaded phases. It was perceived that asymmetry also influences waveform of a phase voltage. The study showed that the studied reserve power machine can be safely used with most at 1.5 kW short circuit motor. With a 2.2 kW motor it was noticed that certain load situations cause an operational safety risk.

Key words: operational safety, aggregate, reserve power machine

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT	6
JOHDANTO	7
1 TEORIAA JA TAUSTATIETOA	8
1.1 Kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin toimintaperiaate	8
1.2 Kolmivaiheinen kuormitus	9
1.2.1 Symmetrinen kolmivaiheinen kuormitus	9
1.2.2 Epäsymmetrinen kolmivaiheinen kuormitus.....	10
1.3 Epälineaarinen kuorma	11
2 MITTAUSTEN TOTEUTUS	12
2.1 Tyhjäkäynti- ja kuormitusajot.....	12
2.1.1 Tyhjäkäynti ja symmetriset kuormitukset.....	14
2.1.2 Epäsymmetriset kuormitukset.....	14
2.2 KytKentäilmiöt kuormitusmuutoksissa	16
2.2.1 Kolmivaihepistorasiaan kytkeytyvät kuormalaitteet.....	16
2.2.2 Yksivaihepistorasioihin kytkeytyvät kuormalaitteet.....	17
2.3 Vikatilanteet.....	18
3 TYHJÄKÄYNTI- JA KUORMITUSAJOT.....	19
3.1 Maadoittamattoman varavoimakoneen sähkön laatu tyhjäkäynnissä	19
3.1.1 Maadoituksen vaikutus tyhjäkäyvän varavoimakoneen sähkön laatuun	21
3.2 Varavoimakoneen sähkön laatu symmetrisellä kuormituksella.....	24
3.2.1 10 %:n tyyppikuorma	24
3.2.2 50 %:n tyyppikuorma	26
3.2.3 100 %:n tyyppikuorma	28
3.2.4 Symmetrinen muuttuva loistehokuormitus	30
3.2.5 Maadoituksen vaikutus symmetrisesti kuormitetun varavoimakoneen sähkön laatuun.....	31
3.3 Varavoimakoneen sähkön laatu epäsymmetrisellä kuormituksella	31
3.3.1 Epäsymmetrisen kuorman syöttäminen maadoittamattoman varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta	31
3.3.2 Maadoittamattoman varavoimakoneen yksivaihepistorasioiden epäsymmetrinen kuormittaminen	36
3.3.3 Epäsymmetrisen kuorman syöttäminen maadoitetun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta	37
3.3.4 Sekakuorman syöttäminen maadoitetun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta	38
4 KYTKENTÄILMIÖT KUORMITUSMUUTOKSISSA	39
4.1 Yksivaiheisen uppopumpun kytkeytyminen	39
4.1.1 Kytkeytyminen kolmivaihepistorasiaan	40
4.1.2 Kytkeytyminen yksivaihepistorasiaan	41
4.2 Epälineaarisen kuorman kytkeytyminen	41
4.2.1 Kytkeytyminen kolmivaihepistorasiaan	42
4.2.2 Kytkeytyminen yksivaihepistorasiaan	43
4.3 Tyyppikuorman kytkeytyminen kolmi- ja yksivaihepistorasioihin	44
4.4 Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin kytkeytyminen.....	45
4.4.1 1,5 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen	45
4.4.2 2,2 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen	45
4.4.3 3 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen	48
5 VIKATILANTEET	49

6	VARAVOIMALAITEVALMISTAJAN OHJEET KÄYTTÄJÄLLE	51
7	POHDINTA.....	53
7.1	Varavoimalaitteen kytkeminen kiinteistön sähköverkkoon.....	53
7.2	Tutkitun varavoimakoneen sähkön laatu	53
7.3	Oikosulkumoottorin mitoitus varavoimalaitekäyttöön	54
7.4	Varavoimakoneen suojalaitteet	54
	LÄHTEET	56
	LIITTEET	57
	Liite 1. Tyhjäkäyntiajojen mittaustulokset	57
	Liite 2. Kuormitusajojen mittaustulokset	63
	Liite 3. Kytkentäilmiöiden mittaustulokset	86
	Liite 4. Vikatilanteiden mittaustulokset	110
	Liite 5. Tyhjäkäynti- ja kuormitusajojen mittauskytkennät	121
	Liite 6. Kytkentäilmiöiden mittauskytkennät	126
	Liite 7. Vikatilanteiden mittauskytkentä	133

LYHENTEET JA TERMIT

THD	Total Harmonic Distortion
PMG	Permanent Magnet Generator
Hz	Hertzi
A	Ampeeri
V	Voltti
W	Watti
LWA	Long Wavelength Array
LWM	Long Wavelength Module

JOHDANTO

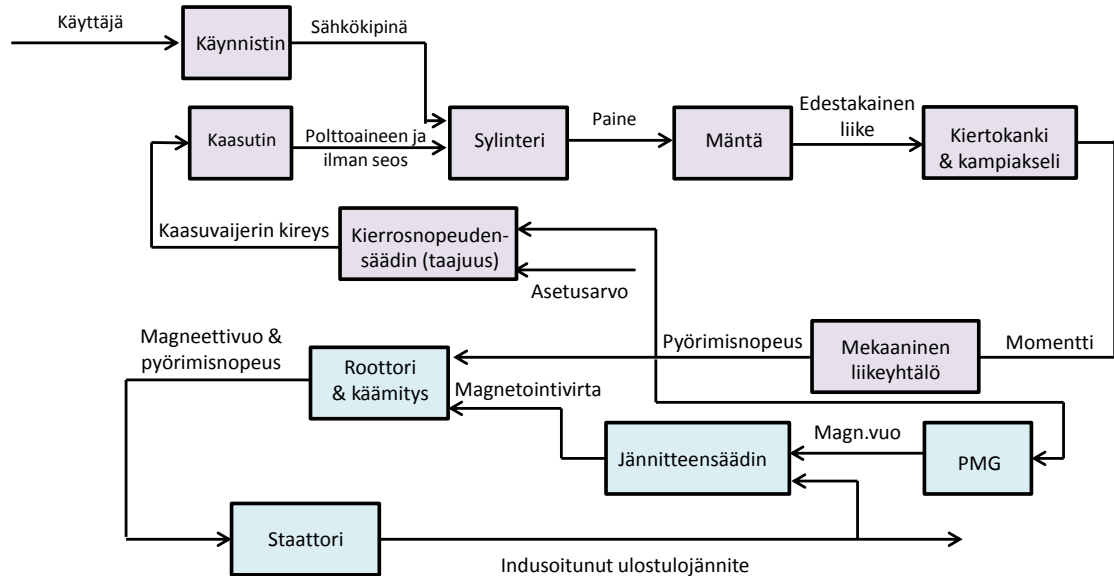
Tapanin- ja Hannunpäivän myrskyt 26. - 27.12.2011 aiheuttivat laajoja sähkökatkoja, joiden seurauksena kotitalouksien kiinnostus varautua sähkökatkoihin on kasvanut. Tämän ovat havainneet myös erilaisten aggregaattien- ja invertterien valmistajat, jotka ovat tuoneet markkinoille monenlaisia ja hintaisia kotitalouskäyttöön soveltuvia varavoimaimaitteita. Tarjolla olevien varavoimaimaitteiden määrä saattaa hämmentää kuluttajia, sillä he eivät välttämättä tiedä millaisen varavoimakoneen käyttötarkoituksiinsa tarvitsevat. Sillä varavoimakoneen hankinnassa on tärkeää huomioida käyttökohde, esimerkiksi pienitehoiset invertteriaggregaatit eivät sovellu oikosulkumoottorikäyttöihin, joihin tuen moottorin käynnistyksessä ottamasta suuresta käynnistysvirrasta.

Toinen tärkeä näkökulma varavoimakoneen hankinnassa on niiden laatu. Sillä kuluttajille on tärkeää, että he saavat varavoimaimaitteensa mahdollisimman edulliseen hintaan. On kuitenkin yleisesti tiedossa, että edullinen hinta ja hyvä laatu kulkevat harvoin käsi kädessä. On siis todettava, että ostettaessa edullinen varavoimaimaite saatetaan tulla ostaneeksi myös samalla hengenvaarallinen laite. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä tutkittiin halvemman hintaluokan kolmivaiheisen magnetoivan Stanley SG5500 -aggregaatin tuottaman sähköön laatua ja käyttöturvallisuutta, erilaisilla kuormilla ja kuormitustilanteilla. Tässä opinnäytetyössä analysoidaan merkittävimpiä mittaustuloksia, sekä pohditaan onko niillä vaikutusta varavoimakoneen käyttöturvallisuuteen.

1 TEORIAA JA TAUSTATIETOA

1.1 Kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin toimintaperiaate

Tutkintotyössä tutkitun kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin toimintaperiaate on esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1. Kolmivaiheisen magnetoivan aggregaatin toimintaperiaate

Kuviossa 1, käyttäjä haluaa tuottaa sähköä varavoimalaitteen avulla. Aluksi käyttäjä käynnistää aggregaatin, virta-avaimella tai käynnistysnarulla. Tällöin sytytystulppa synnyttää korkeajännitteisen sähkökipinän, joka sytyttää sylinterin palotilassa olevan polttoaineen ja ilman seoksen, jolloin syntyy räjähdys. Palotilan räjähdys aiheuttavat muuttuvan paineen sylinterissä, joka saa männän liikkumaan edestakaisin. Tämä edestakainen liike muutetaan kiertokangen ja kampiakselin avulla momentiksi ja edelleen pyörimisnopeudeksi (Karhima 2012, 116, 140.) Aggregaatin kuormamuutokset vaikuttavat kampiakselin pyörimisnopeuteen, joka on kuluttajille myytävissä aggregaateissa yleensä asetettu vakioksi. Pyörimisnopeuden säätö tapahtuu kierrosnopeudensäätimellä, joka vertailee kampiakselin pyörimisnopeutta ja asetusrvoa keskenään. Näiden kahden arvon erotuksen perusteella säädin, joko kiristää tai löysää kaasuvaijeria Polttomoottorin akseli on kiinnitetty varavoimakoneen, generaattorin roottorin kanssa samalle akselille. Roottoriin on käämitty kuparivyyhtejä, joihin johdetaan PMG:n avulla tuotettua tasavirtaa, joka synnyttää roottorin käämeihin magneettivuon. Pyörivän roottorin ja

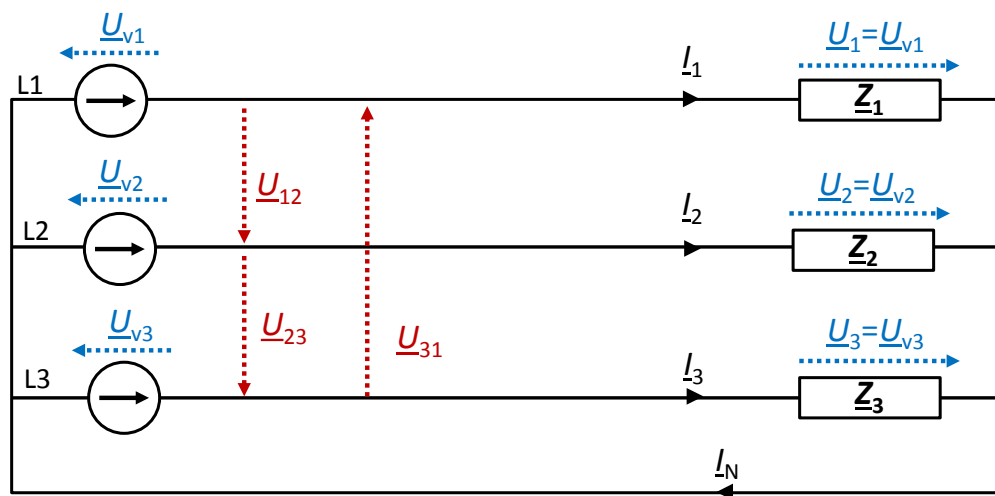
magneettivuon yhteisvaikutus, indusoi staattorikäämityksiin sinimuotoisen lähdejännitteen. Indusoituvan lähdejännitteen suuruus riippuu, aggregaatin pistorasiaan kytketyn kuormituksen reaktiivisuudesta. Induktiivinen kuorma pienentää lähdejännitettä, jolloin magnetointia on lisättävä, jotta aggregaatin liitinjännite saadaan pidettyä vakiona. Kapasiivinen kuormitus taas kasvattaa liitinjännitettä, jolloin magnetointivirtaa on pienennettävä. Magnetointivirran suuruutta säättää jännitteensäädin, joka vertailee ulostulojännitteen sekä asetusarvojen erotusta, ja kasvattaa tai pienentää magnetointia sen perusteella (Hietalahti 2011 [a], 88–90.)

1.2 Kolmivaiheinen kuormitus

Kolmivaiheiset kuormitukset voidaan jakaa kahteen pääryhmään: symmetriset ja epäsymmetriset kolmivaihekuormitukset. Tässä teoriaosuudessa käsitellään ainoastaan tähtikytkeäisen kolmivaiheverkon, jännitteiden ja virtojen käyttäytymistä symmetrisillä ja epäsymmetrisillä kuormilla, koska kotitalouksien sähköverkot ovat tähtikytkeäisiä.

1.2.1 Symmetrinen kolmivaiheinen kuormitus

Kuviossa 2 on esitetty tähtenkytketty kolmivaiheinen kuormitus, johon on kytketty paluujohdin.

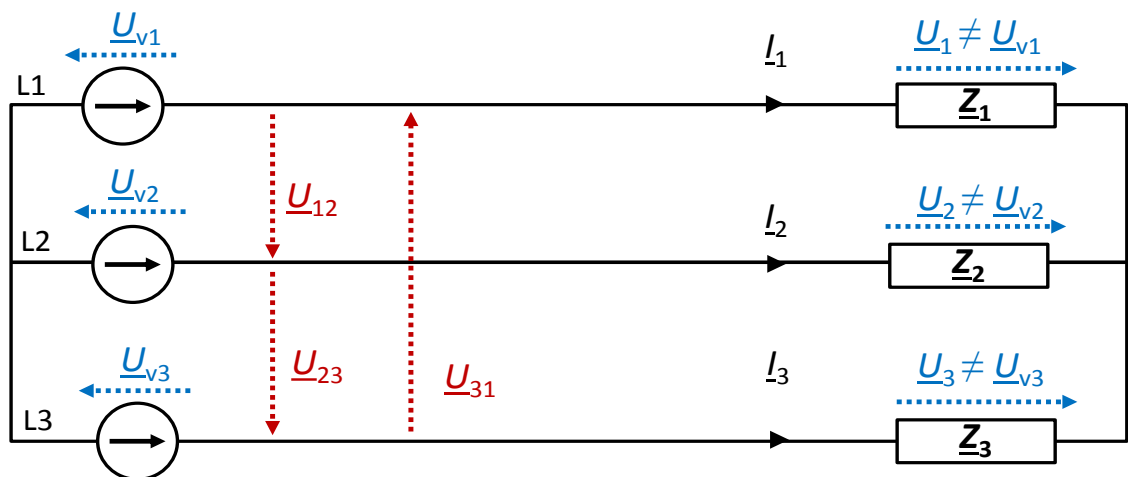


KUVIO 2. Tähtikytkeäinen kolmivaihekuormitus, jolla on paluujohdin (Hietalahti & Tarkka 2006, 255 muokattu)

Kuviosta 2 havaitaan, että vaiheen L1 kuorman yli vaikuttaa jännite \underline{U}_1 , joka on yhtä suuri kuin vaiheen L1, vaihejännite \underline{U}_{v1} . Kuormituksen ollessa symmetrinen vaikuttaa kuorman yli vaihejännite, huolimatta siitä onko paluujohdin kytketty vai kytkemättä. Symmetrisellä kolmivaiheisella kuormituksella, paluujohtimessa ei kulje virtaa \underline{I}_N , vaan esimerkiksi kuorman \underline{Z}_1 , virta \underline{I}_1 palaa verkkoon vaiheiden L2 ja L3 kautta. Symmetrisellä kolmivaiheisella kuormituksella paluujohtimella tai sen puuttumisella, ei siis ole vaikutusta vaihejännitteisiin eikä vaihevirtoihin (Hietalahti & Tarkka 2006, 255–256.)

1.2.2 Epäsymmetrinen kolmivaiheinen kuormitus

Epäsymmetrisellä kolmivaihekuormituksella kuviossa 2 esitettyihin kuormaimpedansseihin \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 ja \underline{Z}_3 vaikuttavat kuormajännitteet \underline{U}_1 , \underline{U}_2 sekä \underline{U}_3 , jotka taas ovat yhtä suuria kuin vaihejännitteet \underline{U}_{v1} , \underline{U}_{v2} ja \underline{U}_{v3} . Kuorman epäsymmetrisyys aiheuttaa kuitenkin sen, että tulevasta vaihevirrasta \underline{I}_1 osa palaa verkkoon paluujohtimen kautta virtana \underline{I}_N , eikä ainoastaan vaiheiden L2 ja L3 kautta, virtoina \underline{I}_2 sekä \underline{I}_3 . Kuviossa 3 on esitetty tähtikytkentäinen, epäsymmetrinen kolmivaihekuormitus, jonka tähtipisteeseen ei ole kytketty paluujohdinta.



KUVIO 3. Epäsymmetrinen tähtikytketty kolmivaihekuormitus, jolla ei ole paluujohdinta (Hietalahti & Tarkka 2006, 263 muokattu)

Kuviosta 3 havaitaan, että paluujohtimen puuttuminen sekä kuorman epäsymmetrisyys aiheuttavat sen, että kuormien yli vaikuttavat kuormajännitteet eivät ole enää samansuuruisia vaihejännitteiden kanssa. Tämän johtuu siitä, että tuleva vaihevirta \underline{I}_1 ei voi enää palata verkkoon luonnollisesti vaiheiden L2 ja L3 kautta, jolloin se aiheuttaa kuorma-

jännitteiden epäsymmetrisyyttä. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi L1 vaiheen kuormaan vaikuttaa ylijännite, ja L3-vaiheen kuorman yli vaikuttaa alijännite. Se, kuinka vaihejännitteiden tasot eroavat toisistaan epäsymmetrisellä kuormalla, johon ei ole kytketty paluujohdinta, riippuu kuormaimpedanssien suuruuksista (Hietalahti & Tarkka 2006, 260–264.)

Kun epäsymmetrinen kuormitus kytketään valtakunnan verkkoon, pysyvät vaihejännitteet \underline{U}_{v1} , \underline{U}_{v2} sekä \underline{U}_{v3} lähes vakioina. Kytkettäessä varavoimakoneeseen epäsymmetrinen kuormitus, eivät lähdejännitteet enää pysykään vakiona, koska lähtökohtaisesti varavoimakoneen sähköntuotto on epävakaampaa. Tähän on syynä virrallisten staattori-käämien synnyttämät magneettivuot, jotka vaikuttavat toisiinsa keskinäisinduktanssin kautta. Tämän vuoksi esimerkiksi, yksivaiheisesti kuormitettu kolmivaiheisen varavoimakoneen vaihe, nostaa muiden kuormittamattomien vaiheiden jännitteitä (Inkinen & Manninen & Tuohi 2009, 179–180.)

1.3 Epälineaarinen kuorma

Epälineaarilla kuormalla tarkoitetaan kuormalaitetta, joka ottaa verkosta epäsinimuotoista kuormitusvirtaa. Esimerkkinä yksivaiheinen tasasuuntaussilta, jonka välipiirissä oleva kondensaattori varautuu, kun silta johtaa. Tasasuuntaussilta on johtavassa tilassa, kun tasasuunnattu verkkojännite ylittää kondensaattorin varausjännitteen. Eli silta on johtamattomassa tilassa, kun kondensaattorin varaus on suurempi, kuin tasasuunnattu jännite. Tästä johtuen kuormavirta, joka otetaan verkosta ajoittuu lyhyelle aikajaksolle, jolloin kuormavirran amplitudi kasvaa, ja tästä syystä aiheuttaa virran epäsinimuotoisuuden (Hietalahti 2011 [b], 57.) Kotitalouksissa yleisin epälineaarinen kuorma on tietokone, joka ottaa tarvitsemansa tasasähkön, muuntamalla sähköverkon vaihtojännitteen, teholähteessään olevan tasasuuntaajan avulla tasajännitteeksi. Epälineaariset kuormat aiheuttaa muun muassa seuraavia ongelmia sähköverkkoon:

- Kolmella jaollisia yliaaltovirtoja, jotka summautuvat nollajohtimeen ja näin ollen voivat aiheuttaa sen ylikuormittumista
- Mahdollisia resonanssitilanteita, jotka synnyttävät piikkimäisiä ylijännitteitä
- Ylimääräisiä häviöitä sekä lämpenemää muuntajissa, kaapeleissa, moottoreissa sekä muissa verkkoon kytketyissä laitteissa (Hietalahti 2011 [b], 55.)

2 MITTAUSTEN TOTEUTUS

Varavoimakoneen käyttöturvallisuustutkimukseen liittyvät mittaukset jaettiin kolmeen eri osioon: tyhjäkäynti- ja kuormitusajot, kytkentäilmiöt kuormitusmuutoksissa sekä vikatilanteet.

2.1 Tyhjäkäynti- ja kuormitusajot

Tyhjäkäynti- ja kuormitusajojen avulla oli tarkoitus tutkia varavoimakoneen tuottaman sähkön laatua, erilaisilla staattisilla kuormituksilla. Saatuja mittaustuloksia verrataan tässä opinnäytetyössä EN 50160 sähkönlaatustandardiin. Kuitenkaan kyseistä standardia ei sovelleta tilapäisissä syöttöjärjestelyissä, joihin kotitalouksien varavoimakonekäytöt lukeutuvat (SFS-EN 50160 2010, 6.) Tästä syystä kaupoissa myytävien aggregaattien ei tarvitse täyttää kyseisen standardin vaatimuksia. Tutkimuksen tarkoituksena oli kuitenkin selvittää, kuinka kuluttajille myytävät varavoimakoneet soveltuisivat kiinteistön varavoimanlähteeksi, niin käyttöturvallisuuden kuin sähkönlaadunkin kannalta. Tutkimuksen kannalta oli siis siksi tärkeää verrata mittaustuloksia, EN 50160 standardissa oleviin pienjänniteverkon sähkönlaatuvaatimuksiin.

Standardi määrittelee testimenetelmän jännitteen osalta seuraavasti:

1. ”Kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksoilta mitatuista keskiarvoista 95 % tulee olla välillä $U_n \pm 10\%$.”
2. ”Kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U_n + 10\% / -15\%$.” (SFS-EN 50160 2010, 20.)

Standardin määrittelemää testimenetelmää jouduttiin kuitenkin soveltamaan siten, että tyhjäkäynti- ja kuormitusajoista otettiin ainoastaan 10 minuutin nauhoitus, viikon mittaisen mittausjakson sijasta. Sillä varavoimakonetta ei pystytty pitämään yhtäjaksoisesti päällä viikkoa, johtuen polttoainetankin tilavuudesta. Toinen syy 10 minuutin mittaiseen kuormitusajoon oli se, että jo tämän mittaisesta ajosta saadaan riittävän vertailukelpoista mittaustietoa. Näiden rajoitteiden vuoksi mitattuja jännitteiden tehollisarvoja verrataan standardiin seuraavasti:

- Mittaustulosten tehollisarvojen 95 % keskiarvoa, verrataan standardin määrittelemän testimenetelmän kohdan 1 asettamiin raja-arvoihin.
- Kaikkien mittaussarvojen keskiarvoa, verrataan standardin määrittelemän testimenetelmän kohdan 2 asettamiin raja-arvoihin.

Taajuuden mittaustuloksia verrataan standardin EN 50160 asettamiin taajuuden raja-arvoihin erillisverkoissa, koska varavoimakäytössä kotitalouskiinteistö toimii saarekkeena, jolloin se muodostaa erillisverkon. Taajuuden mittaustavan standardi, kuitenkin määrittelee siten, että perustaajuuden keskiarvo mitataan 10 sekunnin aikaväliltä, viikon ajan. Aiemmin mainittujen rajoitteiden vuoksi, myös taajuutta mitattiin 10 minuutin nauhoituksella, josta saatuja mittaustuloksia verrataan standardin asettamaan raja-arvoon, jossa taajuuden tulee olla 100 % ajasta välillä 50 Hz \pm 15 % (SFS-EN 50160 210, 20.)

Harmonisten yliaaltojännitteiden mittaustavan standardi EN 50160, määrittelee seuraavasti: ”Viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1” (SFS-EN 50160 2010, 22.) Standardin EN 50160, mukaan THD:n tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 % (SFS-EN 50160 2010, 22). Saatuja mittaustuloksia sovelletaan standardiin siten, että 10 minuuttia kestävä nauhoituksen arvoja verrataan taulukossa 1 esitettyihin raja-arvoihin.

TAULUKKO 1. Sallitut jännitteen yliaaltopitoisuudet (SFS-EN 50160 2010, 22)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.					

Tyhjäkäynti- ja kuormitusajojen sähkönlaadunmittaukseen käytettiin Fluke 435 -tehoanalysaattoria, jolla saatujen mittaustulosten analysointiin käytettiin Fluke Power-Log -ohjelmaa.

2.1.1 Tyhjäkäynti ja symmetriset kuormitukset

Kuormittamattoman varavoimakoneen sähkön laatua tutkittiin tyhjäkäyntiajolla, jolla saatiin selvitettyä millaista sähköä, tutkittava aggregaatti tuottaa lähtökohtaisesti. Tyhjäkäyvän varavoimakoneen sähkön laatua tutkittiin, maadoittamattomana sekä maadoitettuna. Näiden tyhjäkäyntimittausten kytkennät on esitetty liitteessä 5.

Tyhjäkäyntiajojen jälkeen varavoimakonetta ajettiin erisuuruisilla kolmivaiheisilla symmetrisillä kuormituksilla, jotka sisälsivät induktiivista loistehoa. Kuormituksien tehokertoimen arvona käytettiin 0,8, jota voidaan pitää tyypillisenä kotitalouden kuormituksen tehokertoimenä. Tästä eteenpäin opinnäytetyössä tämän tyyppisestä kuormituksesta käytetään nimitystä tyyppikuorma.

Varavoimakonetta kuormitettiin 10 %:lla, 50 %:lla ja 100 %:lla varavoimakoneen nimellisestä pätötehosta, joka tutkitulla aggregaatilla oli 3,6 kW. Kyseiset kuormitusajot suoritettiin maadoittamattomana sekä maadoitettuna, näiden kuormitusajojen mittauskytkennät on esitetty liitteessä 5.

Erilaisten loistehokuormien vaikutusta varavoimakoneen sähkön laatuun tutkittiin kuormitusajolla, jossa kuormituksen tehokerrointa muutettiin portaittain. Aluksi kuormituksena käytettiin puhdasta resistiivistä kuormaa, johon lisättiin asteittain induktiivista loistehoa niin, että lopuksi kuormana oli puhdas induktanssi. Sama toistettiin lisäämällä resistiivisen kuorman rinnalle kapasitiivista loistehoa. Käytetty mittauskytkentä oli sama, kuin symmetrisillä tyyppikuormilla.

2.1.2 Epäsymmetriset kuormitukset

Epäsymmetrisillä kuormituksilla tutkittiin epäsymmetrian vaikutusta varavoimakoneen tuottamiin jännitteisiin, kolmivaihepistorasiasta ja yksivaihepistorasioista. Mittaukset

tehtiin varavoimakoneen ollessa maadoittamattomana sekä maadoitettuna. Maadoittamattomalla varavoimakoneella tutkittiin, kolmivaihepistorasiasta saatavan sähkön laatua paluujohtimella ja ilman, joista molemmista otettiin 10 minuutin nauhoitusajot. Paluujohtimen puuttumisella oli tarkoitus simuloida niin kutsuttua nollavikaa, jonka aiheuttaman kuormajännite-epäsymmetrian vaikutusta, varavoimakoneen tuottaman sähkön laatuun haluttiin tutkia. Maadoittamattoman varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta tutkittiin myös, sen vaihejännitteiden aaltomuotoja, kun yhtä vaihetta ylikuormitetaan, kahden muun vaiheen ollessa kuormittamattomia. Kyseinen mittauskytkentä on esitetty liitteessä 5.

Yksivaihepistorasioiden epäsymmetriaa tutkittiin, kytkemällä vaiheen L2 pistorasiaan nimellistehon suuruinen resistiivinen kuorma, vaiheiden L1 ja L3 yksivaihepistorasioiden ollessa kuormittamattomia. Mittaukset suoritettiin kuormittamattoman L1-vaiheen pistorasiasta, 10 minuutin nauhoitusajolla. Kyseinen mittauskytkentä on esitetty liitteessä 5.

Kolmivaiheinen epäsymmetrinen kuormitus sekä paluujohtimen puuttuminen aiheuttivat sen, että käytettyjen kuormalaitteiden omat suojalaitteet toimivat, ja laukaisivat kuormalaitteet pois varavoimakoneen syöttämästä verkosta. Jotta paluujohtimen kytkemisen / kytkemättömyyden vaikutusta sähkön laatuun voitiin verrata, määritettiin kuormitukset, joilla voitiin suorittaa 10 minuutin nauhoitusajot ilman, että kuormalaitteiden suojalaitteet toimivat. Tästä syystä epäsymmetria rajoittui, paluujohtimen ollessa kytkettynä seuraavasti:

- L1: $P = 950 \text{ W}$; $\cos\varphi 0,8$
- L2: $P = 620 \text{ W}$; $\cos\varphi 0,8$
- L3: $P = 620 \text{ W}$; $\cos\varphi 0,8$

Maadoitettuna tutkittiin ainoastaan kolmivaihepistorasiasta saatavan sähkön laatua, paluujohtimen ollessa kytkettynä. Varavoimakoneen L1-vaihetta kuormitettiin 990 W:n teholla, jonka tehokerroin oli 0,8. Samaan aikaan vaiheet L2 sekä L3, olivat kuormittamattomia. Käytetty mittauskytkentä on esitetty liitteessä 5.

Epäsymmetriaa tutkittiin myös kuormatyyppien epäsymmetrialla, eli jokaista kolmivaihepistorasian vaihetta kuormitettiin erityyppisellä kuormalla. L1-vaihetta kuormitettiin

induktiivista loistehoa sisältävällä kuormalla, jonka teho oli 630 W ja tehokerroin 0,8. Vaihetta L2 kuormitettiin epälineaaraisella kuormalla, jonka teho oli 430 W ja tehokerroin 0,97. Vaihetta L3 puolestaan, kuormitettiin 600 W:n puhtaasti resistiivisellä kuormalla. Mittauskytkentä on esitetty liitteessä 5.

2.2 Kytcentäilmiöt kuormitusmuutoksissa

Kuormitusmuutosten tutkimisella pyrittiin selvittämään erityyppisten kuormien kytkeytymisten ja putoamisten vaikutusta tutkittavan aggregaatin jännitteisiin. Sillä äkillinen kuormitusmuutos saattaa aiheuttaa hetkellisiä yli- tai alijännitteitä varavoimakoneen pistorasioiden navoissa, jotka saattavat vaurioittaa muita aggregaattiin kytkettyjä kuormalaitteita. Etenkin herkkää elektroniikkaa sisältävät kuormalaitteet saattavat olla erittäin herkkiä ylijännitepiikeille. Rikkoutunut sähkölaite saattaa, esimerkiksi syttyä palamaan, josta saattaa syntyä pahimmassa tapauksessa henkilö- tai omaisuusvahinkoja. Ylijännitepiikit ovat siis riski varavoimakoneen käyttöturvallisuudelle. Jännitekuopat eli hetkelliset alijännitteet taas saattavat aiheuttaa ongelmia sähkölaitteiden ohjauspiireille. Esimerkiksi sähkönsyöttöjä ohjaavien kontaktorien ohjauskelat päästävät, kun kelan ohjausjännite putoaa liian pieneksi. Tämä taas aiheuttaa sen, että kontaktorin koskettimet aukeavat ja sähkönsyöttö keskeytyy, josta taas saattaa syntyä käyttöturvallisuusriski.

Kuormitusmuutosten synnyttämiä kytcentäilmiöitä tutkittiin Agilent Technologiesin DSO1012A -oskilloskoopilla. Kyseinen oskilloskooppi oli kaksikanavainen, jonka vuoksi kolmivaihejärjestelmän jännitteiden tutkimista varten käytettiin kahta DSO1012A -oskilloskooppia. Kuormitusmuutoksia tutkittiin maadoittamattoman varavoimakoneen, kolmivaihepistorasiasta ja yksivaihepistorasioista. Kytcentäilmiöiden tutkimiseen käytetyt mittauskytkennät on esitetty liitteessä 6.

2.2.1 Kolmivaihepistorasiaan kytkeytyvät kuormalaitteet

Kolmivaihepistorasiaan kytkettiin ja siitä pudotettiin seuraavanlaisia kuormia:

- Kolmivaiheinen oikosulkumoottori

- $P = 1,5 \text{ kW}$, $I_N = 3,5 \text{ A}$ ja $\cos\varphi = 0,79$
- $P = 2,2 \text{ kW}$, $I_N = 4,9 \text{ A}$ ja $\cos\varphi = 0,83$
- $P = 2 \times 1,5 \text{ kW}$, $I_N = 2 \cdot 3,5 \text{ A}$ ja $\cos\varphi = 0,79$
- Tyypikuorma ($P = 1,2 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 0,8$)
- Yksivaiheinen uppopumppu ($P = 810 \text{ W}$)
- Epälineaarinen kuorma ($P = 200 \text{ W}$)

Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin kytkeytymisellä varavoimakoneeseen tutkittiin, kuinka varavoimakone käyttäytyy, jos siihen kytkettäisiin esimerkiksi maalämpöpumppu. Kytkeämuutoksissa mitattiin varavoimakoneen kolmivaihepistorasian pääjännitteitä.

Tyypikuorman kuorman, yksivaiheisen uppopumpun sekä epälineaarisen kuorman kytkeytymisessä ja putoamisessa, tutkittiin syntyykö kytkentähetkellä vaarallisia yli- tai alijännitteitä. Näiden kuormalaitteiden kytkeytymisissä ja putoamisissa käytettiin kolmivaiheista symmetristä 110 W:n pohjakuormaa.

2.2.2 Yksivaihepistorasioihin kytkeytyvät kuormalaitteet

Yksivaihepistorasiaan kytkettiin ja siitä pudotettiin seuraavanlaisia kuormalaitteita:

- Tyypikuorma ($P = 1,2 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 0,8$)
- Yksivaiheinen uppopumppu ($P = 810 \text{ W}$)
- Epälineaarinen kuorma ($P = 200 \text{ W}$)

Varavoimakoneen yksivaihepistorasioihin kytkeytyvien kuormalaitteiden aiheuttamia kytkentä ilmiöitä tutkittiin, vaiheiden L1 ja L2 pistorasioista. Vaiheeseen L2 kytkettiin 110 W:n peruskuorman rinnalle tutkittava kuormalaite, ja L1-vaiheen ollessa kuormittamattomana. Molemmista vaiheista otettiin oskilloskoopin avulla jännitteiden aaltomuodot.

2.3 Vikatilanteet

Luomalla varavoimakoneen syöttämän verkon erikohdissa eriasteisia oikosulkuja tutkittiin, pystyykö varavoimakone tuottamaan riittävän suurta oikosulkuvirtaa, jotta suoja-laitteet toimivat riittävän nopeasti. Tutkimuksissa tehtiin 1-, 2- ja 3-vaiheisia oikosulkuja, lähellä varavoimakoneen kolmivaihepistorasian napoja sekä 35 m pitkän kaapelin päässä. Oikosulkutilanteen aikaisista sähkösuureista mitattiin vaihejännitettä U_{v1} sekä vaihevirtoja I_1 , I_2 ja I_3 , kahden oskilloskoopin avulla. Mittauskytkentä on esitetty liitteessä 7. Vikatilanne tutkimuksissa kokeiltiin myös, kuinka vikavirtasuoja käyttäytyy liitettynä maadoittamattomaan varavoimakoneeseen. Jonka tarkoituksena oli osoittaa kulkeeko varavoimakoneen ja kuorman välillä vuotovirtaa, joka laukaisisi vikavirtasuojan.

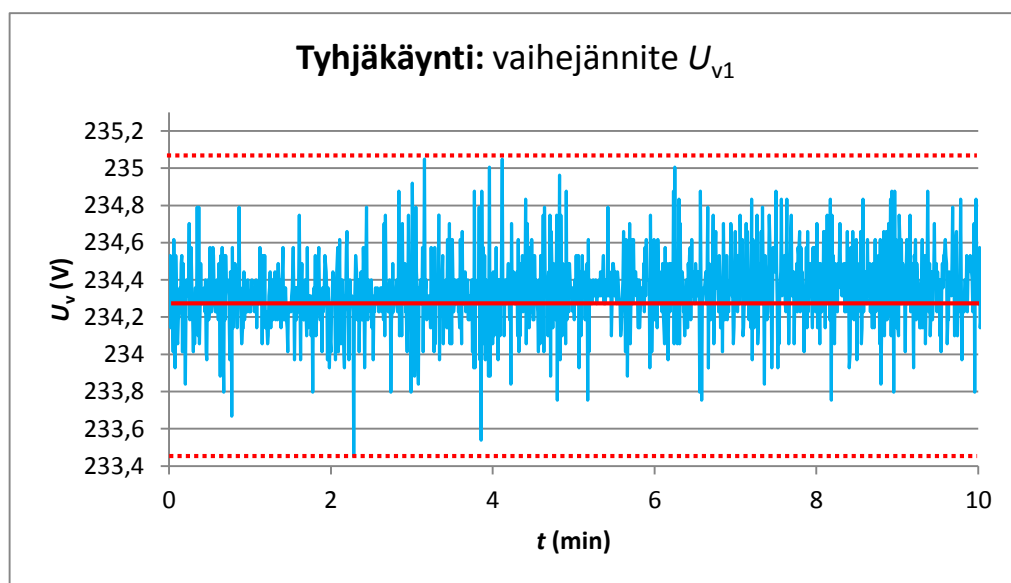
3 TYHJÄKÄYNTI- JA KUORMITUSAJOT

Tyhjäkäynti- ja kuormitusajojen mittaustulosten analysoinnin apuvälineenä käytettiin Fluken PowerLog -ohjelmaa, joka laski Fluke 435:llä nauhoitetuista mittaustiedoista seuraavat arvot:

- Jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot 95 %:ia sekä 100 %:ia, mittausjakson ajasta
- Vaihejännitteiden yliaallot sekä niiden perusteella määritteli THD:n
- Pätötehon, loistehon, näennäistehon sekä tehokertoimen

3.1 Maadoittamattoman varavoimakoneen sähkön laatu tyhjäkäynnissä

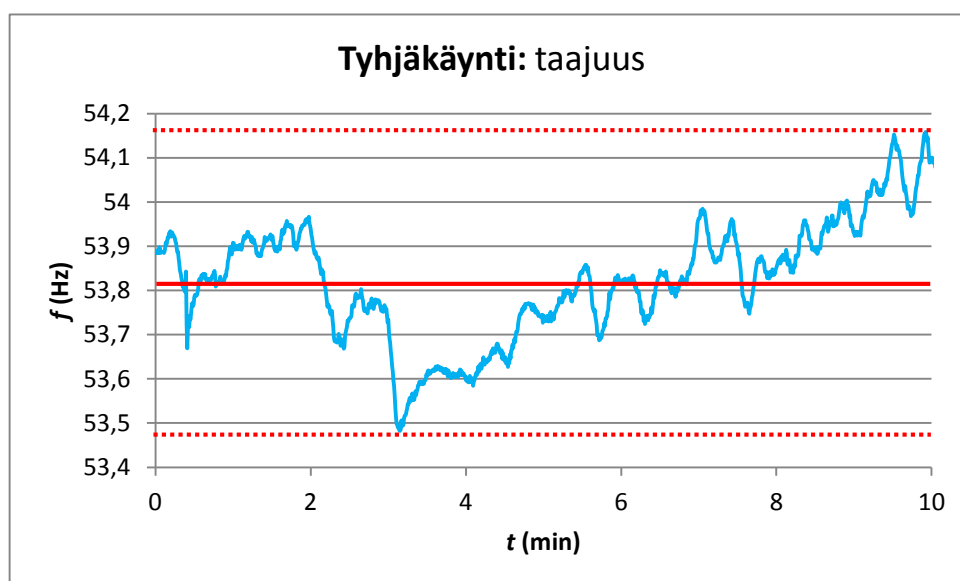
Maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntiajalla tutkittiin millaista, on kuormittamattoman varavoimakoneen sähkön laatu. Mittauksissa nauhoitettiin 10 minuutin ajan taajuutta, vaihejännitteiden tehollisarvoja sekä jännitteiden yliaaltoja. Nauhoituksen jälkeen vaihejännitteiden aaltomuodoista otettiin kuvakaappaus.. Kuviossa 4 on esitetty kolmivaihepistorasiasta mitatun vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 1 on esitetty kaikkien vaiheiden tyhjäkäyntijännitteiden tehollisarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta, kun varavoimakone oli maadoittamattomana.



KUVIO 4. Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1}

Kuviosta 4 havaitaan, että vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvojen keskiarvot vaihtelevat välillä 233,45 - 235,05 V. Vaihejännitteen vaihteluväli on erittäin pieni, eli varavoimakoneen tuottama vaihejännite pysyy suhteellisen vakiona, koko 10 minuutin ajan. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 234,3 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 234,7 V. Voidaan siis todeta, että jännitteet täyttävät standardin EN 50160 asettamat vaatimukset.

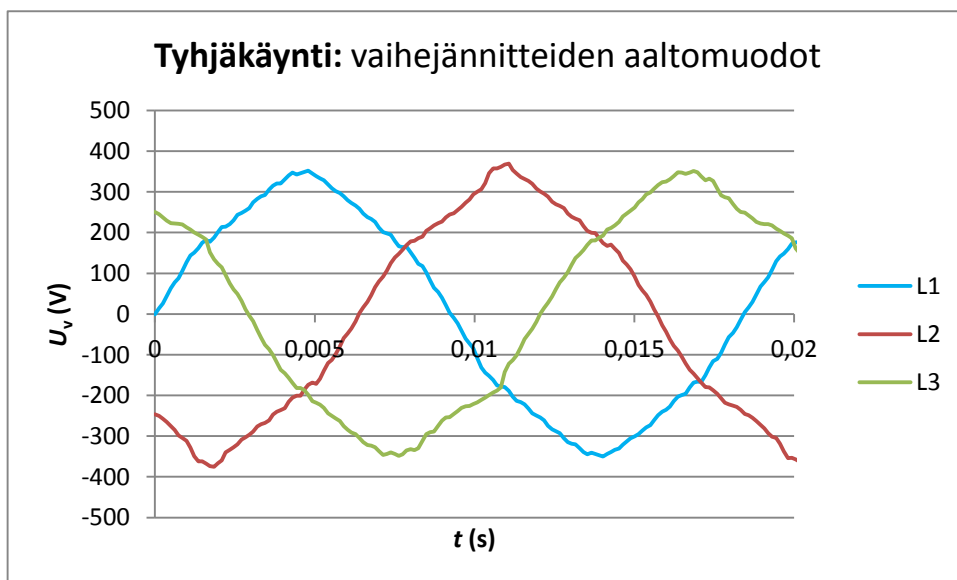
Kuviossa 5 on esitetty maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus 10 minuutin kuormitusjaksolta.



KUVIO 5. Maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus

Kuviosta 5 havaitaan, että taajuus vaihtelee välillä 53,48 - 54,16 Hz, eli taajuuden heilahtelu on erittäin vähäistä. Laskennan tuloksena kaikkien taajuuden mittausarvojen keskiarvo on 53,8 Hz. Vaikka taajuus on 3,8 Hz suurempi kuin perustaajuus 50 Hz:iä, täyttää se silti standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, erillisverkkojen taajuuksille.

Kuviossa 6 on esitetty maadoittamattoman, tyhjäkäyvän varavoimakoneen tuottamien vaihejännitteiden aaltomuodot.



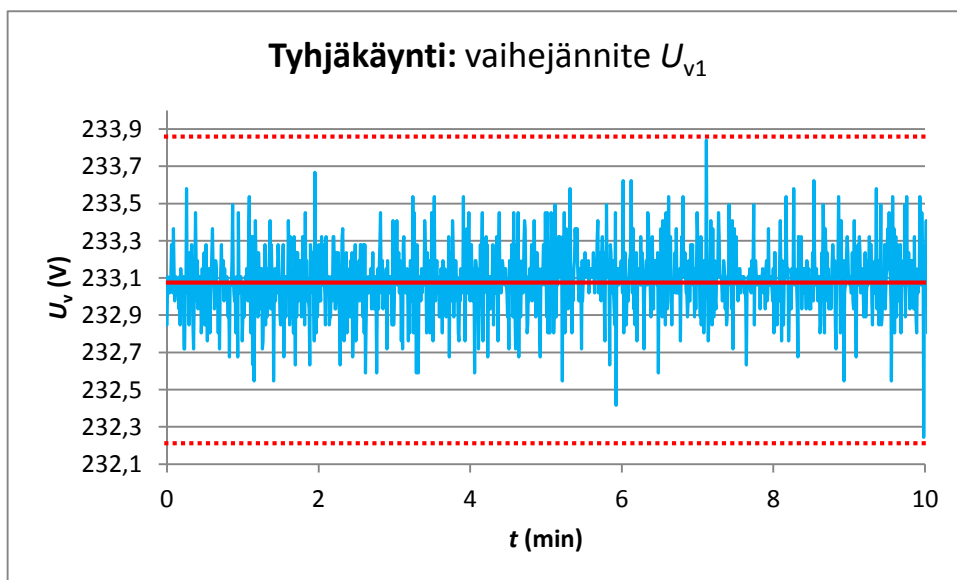
KUVIO 6. Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot

Kuviosta 6 huomataan, että tyhjäkäynnissä vaihejännitteissä on havaittavissa yliaaltoja. PowerLog laskennan tuloksista (liite 1, taulukko 1.1) havaitaan, että yliaallot ovat suurimmaksi osaksi 5. yliaaltoja. Eniten 5. yliaaltoja on vaiheen L2, vaihejännitteessä U_{v2} , jonka osuus perustaajuudesta on 6,6 %. Vaihejännitejännitteen U_{v2} 5. yliaaltopitoisuus on yli standardin asettaman 6 %:n rajan. Muiden vaiheiden ja yliaaltopitoisuuksien osalta, kuitenkin alitetaan taulukossa 1 esitetyt raja-arvot.

Liitteessä 1 on esitetty L1-vaiheen yksivaihepistorasiasta saatavan vaihejännitteen U_{v1} aaltomuoto, kun varavoimakone käy maadoittamattomana tyhjäkäynnillä. Verrattaessa kuviota 6 ja liitteen 1 kuviota 1.6 keskenään voidaan todeta, että tutkitavan varavoimakoneen yksivaihepistorasioista saatava jännite on täysin samanlaista, kuin kolmivaihepistorasioista saatava jännite.

3.1.1 Maadoituksen vaikutus tyhjäkäyvän varavoimakoneen sähkön laatuun

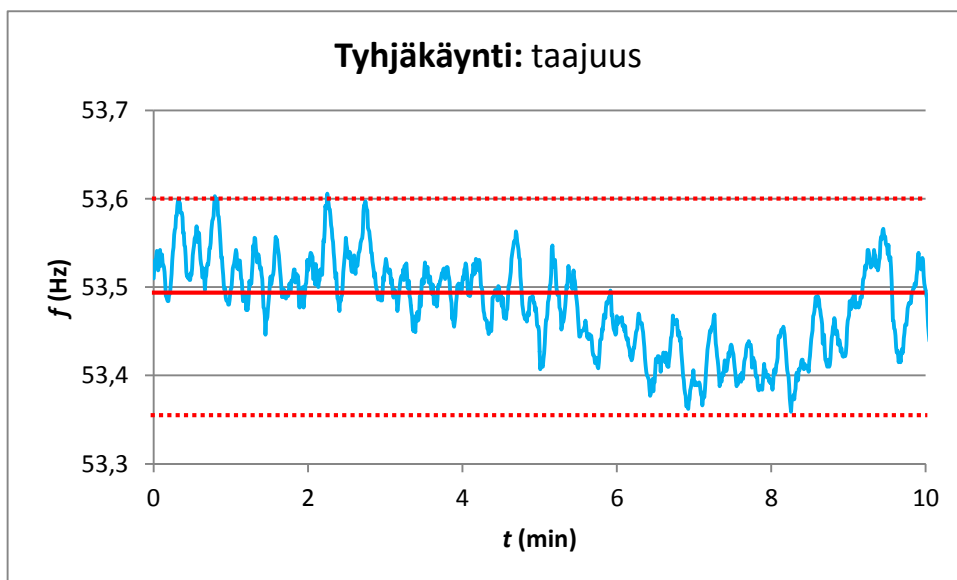
Maadoittamalla varavoimakone tutkittiin, onko maadoituksella vaikutusta tyhjäkäyvän koneen tuottaman sähkön laatuun. Kuviossa 7 on esitetty maadoitetun tyhjäkäyvän varavoimakoneen vaihejännitteen U_{v1} , tehollisarvojen keskiarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 1 on esitetty kaikkien vaiheiden tyhjäkäyntijännitteiden tehollisarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta, kun varavoimakone oli maadoitettu.



KUVIO 7. Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v1}

Kuviosta 7 havaitaan, että maadoitettuna vaihejännitteen U_{v1} , tehollisarvojen keskiarvot vaihtelevat välillä 232,24 - 233,84 V. Verrattuna maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntijännitteen tehollisarvojen keskiarvoihin, on ero mitätön. Laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 233,1 V ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 233,4 V. Verrattaessa mittaustuloksia standardin EN 50160 asettamiin vaatimuksiin, on myös maadoitetun varavoimakoneen tuottama jännite vaatimusten mukaista. Laskennan tuloksista havaitaan, että maadoitettuna vaihejännite on hieman pienempi, kuin maadoittamattomana. Ero näiden mittaustulosten välillä on kuitenkin mitätön, joten voidaan siis todeta, että maadoituksella ei ole vaikutusta tyhjäkäyvän varavoimakoneen tuottaman jännitteen suuruuteen.

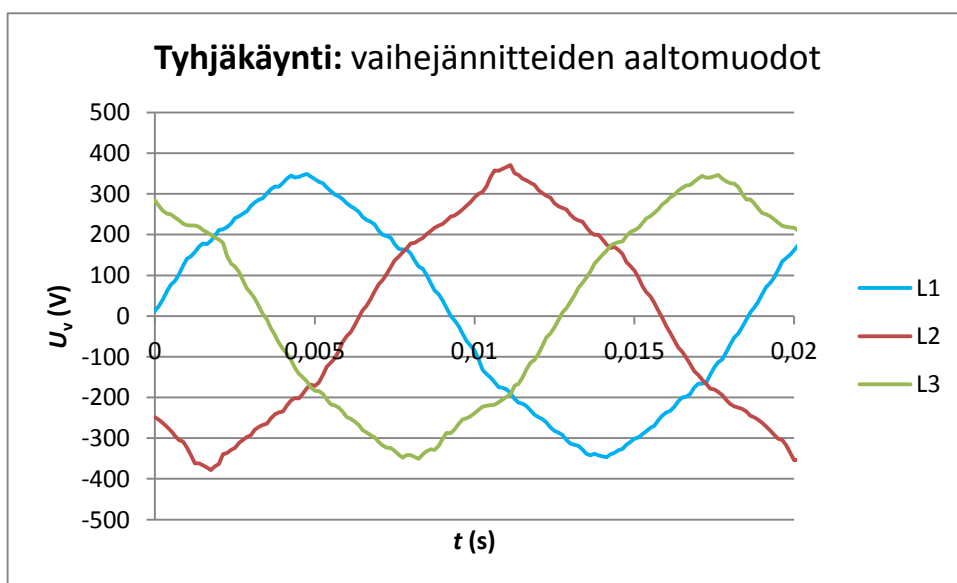
Kuviossa 8 on esitetty maadoitetun varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus, 10 minuutin kuormitusjaksolta.



KUVIO 8. Maadoitetun varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus

Kuviosta 8 havaitaan, että taajuus vaihtelee välillä 53,36 - 53,61 Hz. Laskennan tuloksena kaikkien taajuuden mittausarvojen keskiarvo on 53,5 Hz. Myös maadoitettuna varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus täyttää standardin EN 50160 vaatimukset. Verrattaessa maadoitetun ja maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuuksia keskenään havaitaan, että ero on mitätön, joka osoittaa, että maadoituksella ei ole vaikutusta tyhjäkäyvän varavoimakoneen taajuuteen.

Kuviossa 9 on esitetty tyhjäkäyvän maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot.



KUVIO 9. Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot

Kuviosta 9 havaitaan, että maadoitettuna varavoimakoneen tyhjäkäyntijännitteiden aaltomuodot eivät juuri eroa, maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntijännitteiden aaltomuodoista. Verrattaessa maadoittamattoman ja maadoitetun varavoimakoneen, PowerLog laskennan tuloksia (liite 1, taulukot 1.1 ja 1.2) keskenään. Havaitaan, että yliaaltopitoisuudet vaihejännitteissä ovat likipitään samat, joka osoittaa, että maadoituksella ei ole vaikutusta tyhjäkäyntijännitteiden yliaaltosisältöön.

3.2 Varavoimakoneen sähkön laatu symmetrisellä kuormituksella

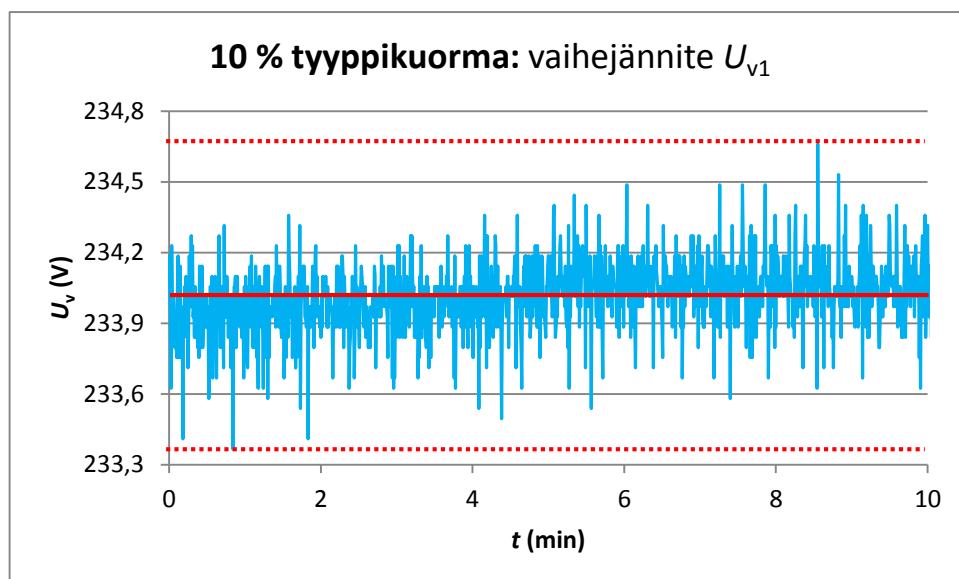
Symmetrisen kolmivaiheisen kuormituksen vaikutusta, varavoimakoneen tuottaman sähkön laatuun, tutkittiin maadoittamattomana ja maadoitettuna. Varavoimakonetta kuormitettiin kuormitusasteilla 10 %, 50 % ja 100 % varavoimakoneen nimellistehosta. Johtuen kuormalaitteiden portaallisesta pätö- ja loiskuorman säädöstä, ei mittauksissa kuormitusasteita saatu asetettua tarkalleen haluttuihin 10 %:in, 50 %:in ja 100 %:in. Kuormatyyppinä käytettiin niin sanottuja tyyppikuormia eli tyypillisiä kotitalouskuormituksia, jotka sisältävät hieman induktiivista loistehoa. Mittauksissa kuormitusten loistehosisältö asetettiin siten, että tehokertoimen arvoksi saatiin 0,8. Varavoimakoneen valmistaja on ilmoittanut aggregaatin suurimmaksi jatkuvan käytön kuormatehoksi 3,6 kW, tehokertoimella 1. Koska mittauksissa tehokertoimen arvona käytettiin 0,8:a, määriteltiin käytetyt kuormitusasteet kuorman näennäistehon perusteella, jotta varavoimakonetta ei ylikuormitettaisi kuormitusasteella 100 %.

Kuormitusajot tehtiin maadoittamattomalla ja maadoitetulla varavoimakoneella. Symmetristen kuormitusten kuormitusajoissa nauhoitettiin 10 minuutin ajan taajuutta, vaihejännitteiden tehollisarvoja sekä yliaaltoja.

3.2.1 10 %:n tyyppikuorma

Varavoimakoneen 10 %:n tyyppikuormalla, kuorman pätöteho oli 135 W ja näennäisteho 162 VA, jolloin tehokerroin oli 0,8. Kuviossa 10 on esitetty maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvot, 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot 10 minu-

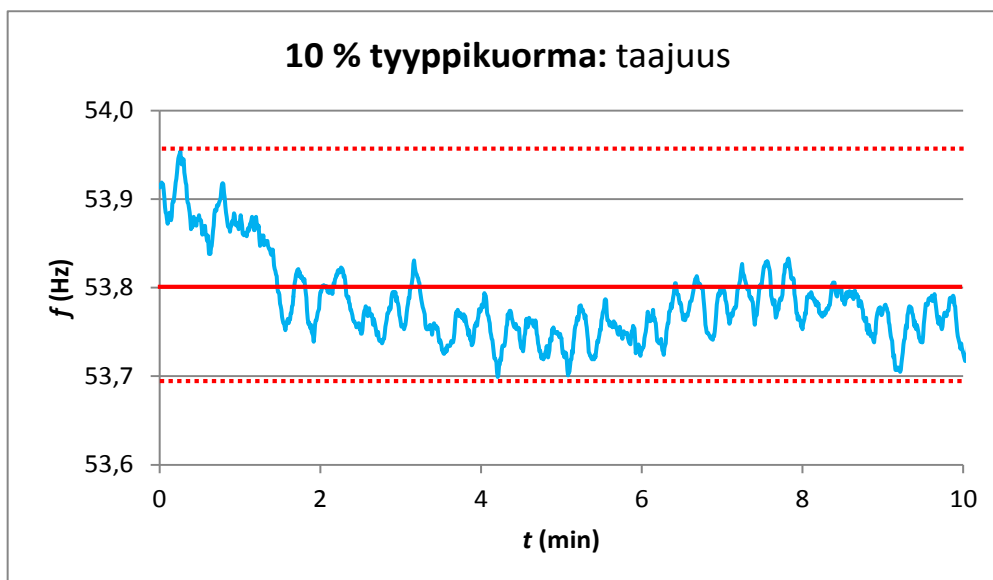
tin kuormitusjaksolta, kun maadoittamatonta varavoimakonetta kuormitettiin symmetrisellä 10 %:n tyyppikuormalla.



KUVIO 10. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 10 %:n tyyppikuorma

Kuviosta 10 havaitaan, että vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvojen keskiarvot vaihtelevat välillä 233,37 - 234,66 V. Vaihtelua voidaan pitää erittäin vähäisenä, eli varavoimakoneen tuottama vaihejännite pysyy 10 %:n tyyppikuormalla suhteellisen vakiona. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 234,0 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 234,2 V. Joten voidaan todeta, että molemmat tehollisarvojen keskiarvot täyttävät standardin EN 50160 asettamat vaatimukset.

Kuviossa 11 on esitetty symmetrisesti 10 %:n tyyppikuormalla kuormitetun, maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus 10 minuutin kuormitusjaksolta.



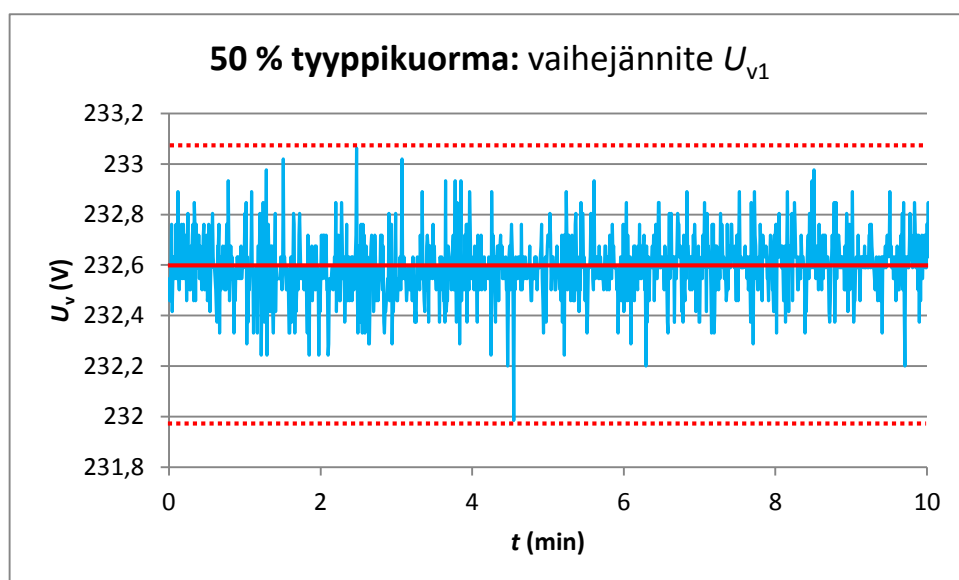
KUVIO 11. Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma

Kuviosta 11 havaitaan, että taajuus vaihtelee välillä 53,70 - 53,95 Hz, joten taajuuden heilahtelu on erittäin vähäistä. Laskennan tuloksena kaikkien taajuuden mittausarvojen keskiarvo on 53,8 Hz. Voidaan siis todeta, että varavoimakoneen tuottaman jännitteen taajuus täyttää standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, erillisverkkojen taajuuksille.

Liitteen 2, taulukossa 2.1 on esitetty vaihejännitteiden yliaallot, kun maadoittamattoman varavoimakoneen kuormana oli 10 %:n tyypikuorma. Verrattaessa (liite 2, taulukko 2.1) arvoja taulukon 1 arvoihin, havaitaan niiden olevan standardin mukaisia.

3.2.2 50 %:n tyypikuorma

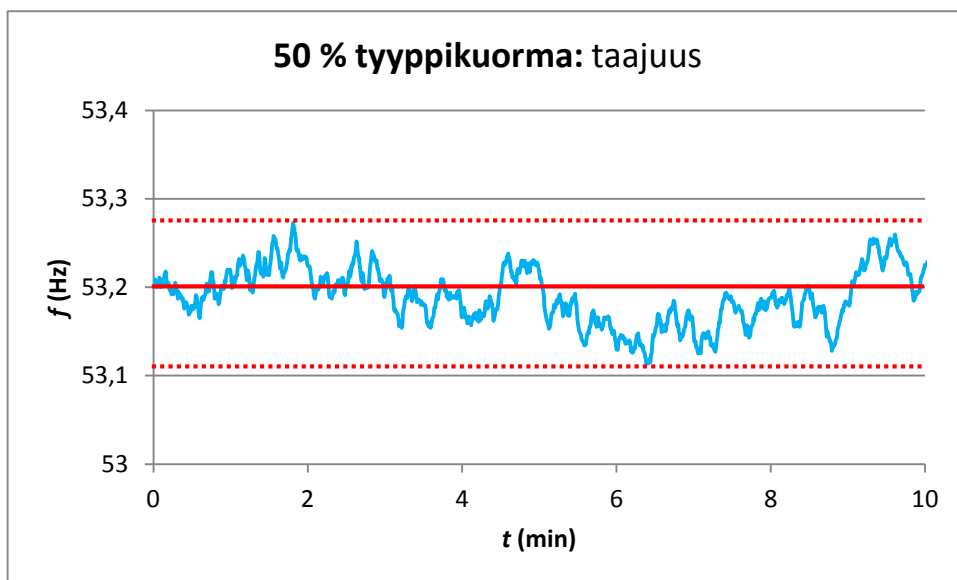
Varavoimakoneen 50 %:n tyypikuormalla, kuorman pätöteho oli 485 W ja näennäisteho 593 VA, jolloin tehokerroin oli 0,8. Kuviossa 12 on esitetty maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvot, 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta, kun maadoittamatonta varavoimakonetta kuormitettiin 50 %:n tyypikuormalla.



KUVIO 12. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

Kuviosta 12 havaitaan, että vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvojen keskiarvot vaihtelevat välillä 231,98 - 233,06 V. Tätä vaihtelua voidaan pitää erittäin vähäisenä, joten varavoimakoneen tuottama vaihejännite pysyy 50 %:n tyypikuormalla, suhteellisen vakiona. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 232,6 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 232,8 V. Voidaan siis todeta, että molemmat tehollisarvojen keskiarvot täyttävät standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, vaikka kuormitus kasvaa. Kuviosta 12 sekä laskennan tuloksista kuitenkin huomataan, että kuormituksen kasvu 10 %:sta 50 %:iin, on pienentänyt vaihejännitteen tehollisarvoa hieman.

Kuviossa 13 on esitetty symmetrisesti 50 %:n tyypikuormalla kuormitetun maadoittamattoman varavoimakoneen tuottaman jännitteen taajuus, 10 minuutin ajalta.



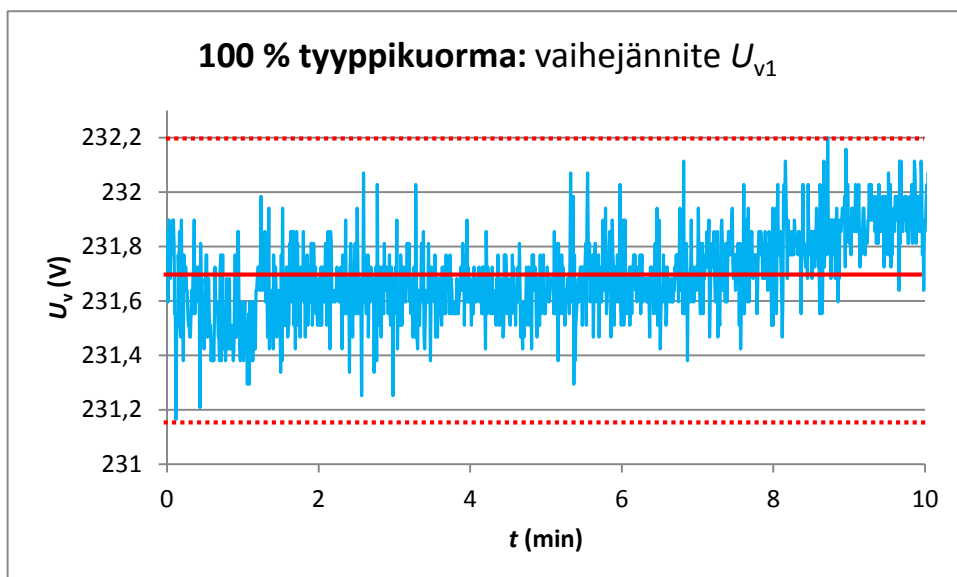
KUVIO 13. Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

Kuviosta 13 havaitaan, että taajuus vaihtelee välillä 53,11 - 53,27 Hz, joten taajuuden heilahtelu on erittäin vähäistä. Laskennan tuloksena kaikkien taajuuden mittausarvojen keskiarvo on 53,2 Hz. Joten voidaan todeta, että varavoimakoneen tuottaman jännitteen taajuus täyttää standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, vaikka kuormitus kasvaa. Varavoimakoneen kuormituksen kasvu on kuitenkin aiheuttanut sen, että taajuuden keskiarvo on hieman pienentynyt.

Liitteen 2, taulukossa 2.2 on esitetty vaihejännitteiden yliaallot, kun maadoittamattoman varavoimakoneen kuormana oli 50 %:n tyypikuorma. Verrattaessa (liite 2, taulukko 2.2) arvoja taulukon 1 arvoihin, havaitaan niiden olevan standardin mukaisia.

3.2.3 100 %:n tyypikuorma

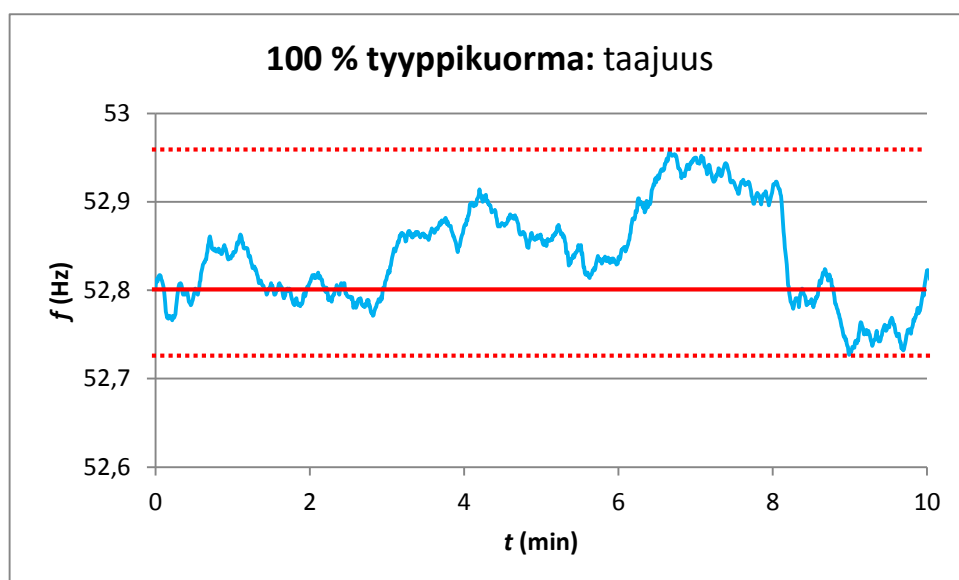
Varavoimakoneen 100 %:n tyypikuormalla, kuorman pätöteho oli 1025 W ja näennäis-teho 1267 VA, jolloin tehokerroin oli 0,8. Kuviossa 14 on esitetty maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvot, 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta, kun maadoittamatonta varavoimakonetta kuormitettiin 100 %:n tyypikuormalla.



KUVIO 14. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma

Kuviosta 14 havaitaan, että vaihejännitteen U_{v1} tehollisarvojen keskiarvot vaihtelevat välillä 231,16 - 232,20 V. Tätä vaihtelua voidaan pitää erittäin vähäisenä, joten varavoimakoneen tuottama vaihejännite pysyy 100 %:n tyypikuormalla suhteellisen vakiona. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 231,7 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 232,0 V. Molemmat tehollisarvojen keskiarvot täyttävät siis standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, vaikka kuormitus kasvaa. On kuitenkin huomattava, että kuormituksen kasvu 50 %:sta 100 %:iin, on pienentänyt hieman vaihejännitteen tehollisarvoa.

Kuviossa 15 on esitetty symmetrisesti 100 % tyypikuormalla kuormitetun maadoittamattoman varavoimakoneen tuottaman sähkön taajuus, 10 minuutin ajalta.



KUVIO 15. Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 100 %:n tyyppikuorma

Kuviosta 15 havaitaan, että taajuus vaihtelee välillä 52,73 – 52,96 Hz, joten taajuuden heilahtelu on erittäin vähäistä. Laskennan tuloksena kaikkien taajuuden mittausarvojen keskiarvo on 52,8 Hz. Varavoimakoneen tuottaman jännitteen taajuus täyttää siis standardin EN 50160 asettamat vaatimukset, vaikka kuormitus kasvaa. Varavoimakoneen kuormituksen kasvu 50 %:sta 100 %:iin on kuitenkin aiheuttanut sen, että taajuuden keskiarvo on pienentynyt.

Liitteen 2, taulukossa 2.3 on esitetty vaihejännitteiden yliaallot, kun maadoittamattoman varavoimakoneen kuormana oli 100 %:n tyyppikuorma. Verrattaessa (liite 2, taulukko 2.3) arvoja taulukon 1 arvoihin, havaitaan niiden olevan standardin mukaisia.

3.2.4 Symmetrinen muuttuva loistehokuormitus

Symmetrisesti kuormitetulla, maadoittamattomalla varavoimakoneella tutkittiin myös, kuinka muuttuva loisteho vaikuttaa varavoimakoneen vaihejännitteisiin. Liitteen 2 kuvassa 2.25 on esitetty, kuinka lisääntyvä induktiivinen loisteho vaikuttaa varavoimakoneen vaihejännitteisiin. Kuviosta havaitaan, että induktiivisen loistehon lisääntymisen vaikutus vaihejännitteeseen on suhteellisen mitätön. Liitteen kuviossa 2.26 taas on esitetty, kuinka lisääntyvä kapasitiivinen loisteho vaikuttaa varavoimakoneen vaihejännitteisiin. Kuviosta havaitaan, että vaihejännite alkaa kasvaa merkittävästi, kun tehokerroin

pienenee alle 0,2. Tällä ei kuitenkaan ole mitään merkitystä kotitalouksien varavoimakäytöissä, koska puhtaasti kapasitiivisia kuormituksia ei niissä esiinny.

3.2.5 Maadoituksen vaikutus symmetrisesti kuormitetun varavoimakoneen sähkö- n laatuun

Liitteessä 2 on esitetty mittaustulokset maadoitetun symmetrisesti tyyppikuormitetun varavoimakoneen, 10 minuutin kuormitusajoista. Mittaustuloksista havaitaan, että erot maadoittamattoman varavoimakoneen mittaustuloksiin ovat mitättömät. Voidaan siis todeta, että maadoituksella ei ole vaikutusta varavoimakoneen tuottaman sähkö-
n laatuun, kun varavoimakonetta kuormitetaan symmetrisesti.

3.3 Varavoimakoneen sähkö- n laatu epäsymmetrisellä kuormituksella

Kuormittamalla maadoittamatonta ja maadoitettua varavoimakonetta, eri sähkönsyöttö-
pisteistä, epäsymmetrisillä kuormituksilla. Selvitettiin, kuinka epäsymmetria vaikuttaa
varavoimakoneen tuottaman sähkö-
n laatuun, ja sitä kautta mahdollisesti käyttöturvalli-
suuteen. Maadoittamattomalla varavoimakoneella tehtiin kolmivaihepistorasiasta 10
minuutin kuormitusajot, joissa epäsymmetrisellä kuormalla oli paluujohdin, sekä epä-
symmetrisellä kuormalla, jolta paluujohdin puuttui. Yksivaihepistorasioiden epäsym-
metrisen kuormituksen vaikutusta sähkö-
n laatuun ja käyttöturvallisuu-
teen tutkittiin, kuormittamalla L2-vaiheen pistorasiaa, ja ottamalla tyhjäkäyvän L1-vaiheen pistorasias-
ta 10 minuutin nauhoitus. Maadoitetulla varavoimakoneella epäsymmetriaa tutkittiin,
kuormittamalla kolmivaihepistorasian L1-vaihetta, vaiheiden L2 ja L3 ollessa kuormit-
tamattomia. Tästä tilanteesta otettiin 10 minuutin nauhoitetut kuormitusajot maadoitet-
tuna ja maadoittamattomana, sekä otettiin kuvakaappaukset jännitteen aaltomuodoista.

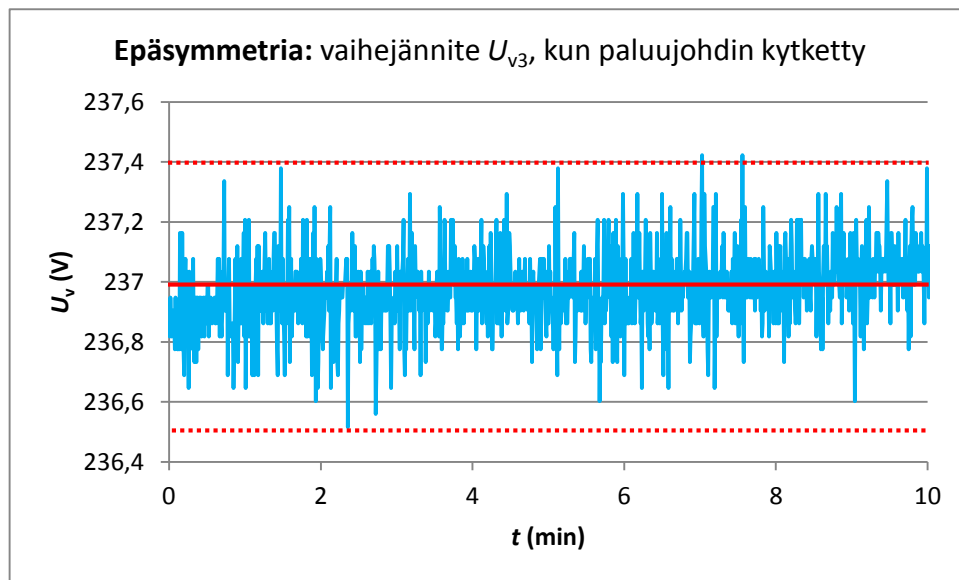
3.3.1 Epäsymmetrisen kuorman syöttäminen maadoittamattoman varavoimako- neen kolmivaihepistorasiasta

Epäsymmetrisesti kuormitetulle maadoittamattomalle varavoimakoneelle tehtiin kaksi
10 minuutin kuormitusajoa. Ensimmäisessä kuormitusajossa epäsymmetriseen kuor-

maan oli kytketty paluujohdin. Toisessa kuormitusajossa epäsymmetriseen kuormaan ei oltu kytketty paluujohdinta, jolloin varavoimakoneen syöttämään verkkoon aiheutettiin ”nollavika”. Molemmissa kuormitusajoissa käytettiin samoja kuormituksia, jotta paluujohtimen vaikutusta voitiin analysoida. Samojen kuormien käyttö aiheutti sen, että epäsymmetriaa jouduttiin rajoittamaan, koska nollajohtimen puuttuessa kuormalaitteiden omat suojalaitteet toimivat eli suorittivat suojaustoiminnan. Seuraavassa on esitetty käytetyt kuormat:

- Paluujohdin kytkettynä:
 - L1: 950 W $\cos\varphi$ 0,8
 - L2: 620 W $\cos\varphi$ 0,8
 - L3: 620 W $\cos\varphi$ 0,8
- Paluujohdin kytkemättä:
 - L1: 810 W $\cos\varphi$ 0,8
 - L2: 590 W $\cos\varphi$ 0,7
 - L3: 730 W $\cos\varphi$ 0,9

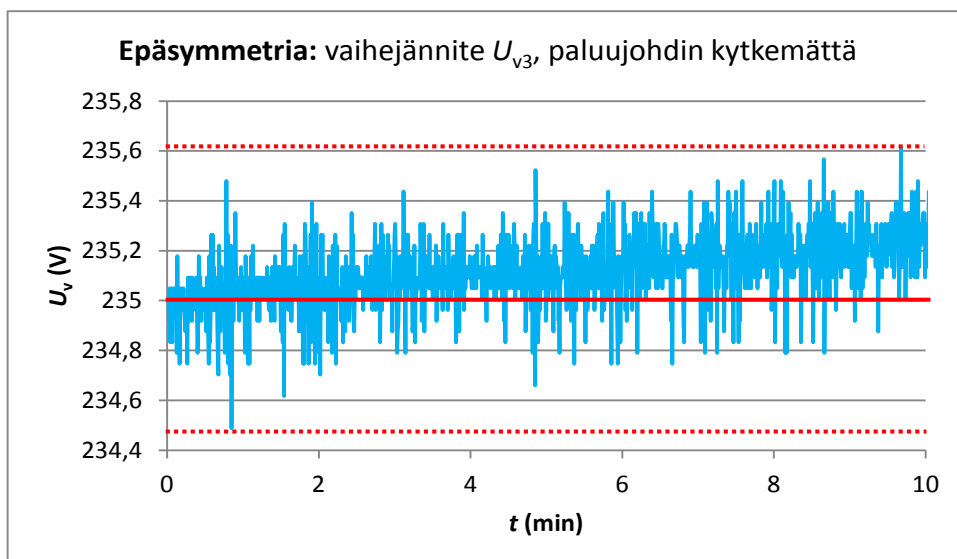
Vaikka kuormia ei muutettu kuormitusajojen välissä, muuttuivat mitatut tehot ja tehokertoimet. Tämä johtuu kuormaepäsymmetriasta sekä paluujohtimen puuttumisen aiheuttamasta kuormajännitteiden epäsymmetriasta, jolloin mitatut teho ja tehokertoimet muuttuvat. 10 minuutin kuormitusajon, jossa epäsymmetriseen kuormitukseen oli kytketty paluujohdin. Vaihejännitteen osalta merkittävän tulos saatiin jännitteestä U_{v3} , joka on esitetty kuviossa 16. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty.



KUVIO 16. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuorma oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty

Kuviosta 16 havaitaan, että vaihejännitteen tehollisarvot vaihtelevat välillä 236,52 - 237,42 V. Varavoimakoneen tuottama jännite ei siis heilahtele merkittävästi, kun kuormitus on epäsymmetrinen, ja paluujohdin on kytketty. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 237,0 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 237,2 V. Voidaan siis todeta, että molemmat tehollisarvojen keskiarvot täyttävät standardin EN 50160 asettamat vaatimukset. Standardi EN 50160, määrittelee sallitun jakelujännitteen epäsymmetrian seuraavasti: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista” (SFS-EN 50160 2010, 22). Tutkimuksissa ei kuitenkaan mitattu myötäkomponenttia, joten tässä yhteydessä ei voida ottaa kantaa täyttääkö varavoimakone standardin asettamia vaatimuksia, jännite-epäsymmetrian osalta.

10 minuutin kuormitusajon, jossa epäsymmetriseen kuormitukseen ei oltu kytketty paluujohdinta, merkittävän tulos vaihejännitteen osalta saatiin jännitteestä U_{v3} , joka on esitetty kuviossa 17. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty.



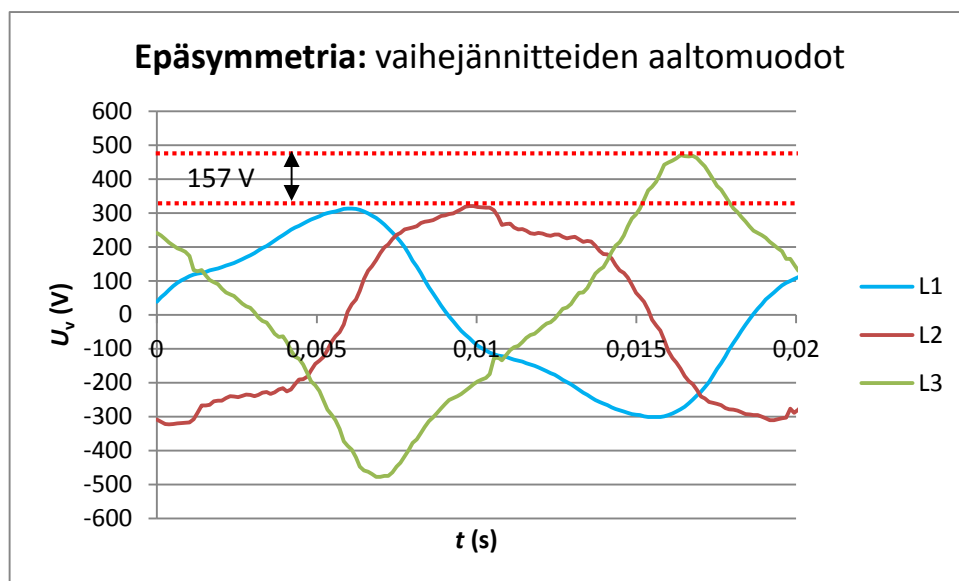
KUVIO 17. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuorma oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty

Kuviosta 17 havaitaan, että vaihejännitteen tehollisarvot vaihtelevat välillä 234,49 - 235,61 V. Varavoimakoneen tuottama jännite ei siis heilahtele merkittävästi silloinkaan, kun epäsymmetriseen kuormitukseen ei ole kytketty paluujohdinta. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 235,1 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 235,8 V. Paluujohdinten puuttuminen on pudottanut hieman jännitetasoja, mutta vaihejännitteet täyttävät silti EN 50160 asettamat vaatimukset. Varavoimakoneen käyttöturvallisuuteen, tämän tasoinen jännite-epäsymmetria ei vaikuta. Paluujohdinten puuttuminen on itsessään kuitenkin käyttöturvallisuusriski, koska kuormajännitteiden tasot voivat vaihdella merkittävästi. Tällä tarkoitetaan sitä, että jonkin vaiheen kuormalla on alijännite, ja jonkin toisen vaiheen kuormalla on merkittävä ylijännite. Jonka vuoksi laitteet saattavat hajota, ja tulipalovaara on ilmeinen.

Liitteessä 2 on esitetty molempien maadoittamattomien epäsymmetristen kuormien kuormitusajojen taajuuksien mittaustulokset. Taajuuksien ei osalta mittauksissa ilmennyt mitään poikkeavaa, eli taajuudet täyttivät molemmissa tapauksissa EN 50160 vaatimukset. Liitteessä 2 on esitetty myös molempien kuormitusajojen, vaihejännitteiden yliaaltosisällöt sekä jännitteiden aaltomuodot. Tuloksista havaitaan, että ne täyttävät molemmissa tapauksissa standardin EN 50150 asettamat vaatimukset.

Maadoittamattomalla varavoimankoneella tehtiin myös mittaus, jossa L1-vaihetta kuormitettiin reilulla ylikuormalla (2,7 kW, $\cos\varphi$ 1), ja L2- ja L3-vaiheet olivat kuormit-

tamattomia. Tilanteesta otettiin kuvakaappaus vaihejännitteiden aaltomuodoista, jotka on esitetty kuviossa 18.

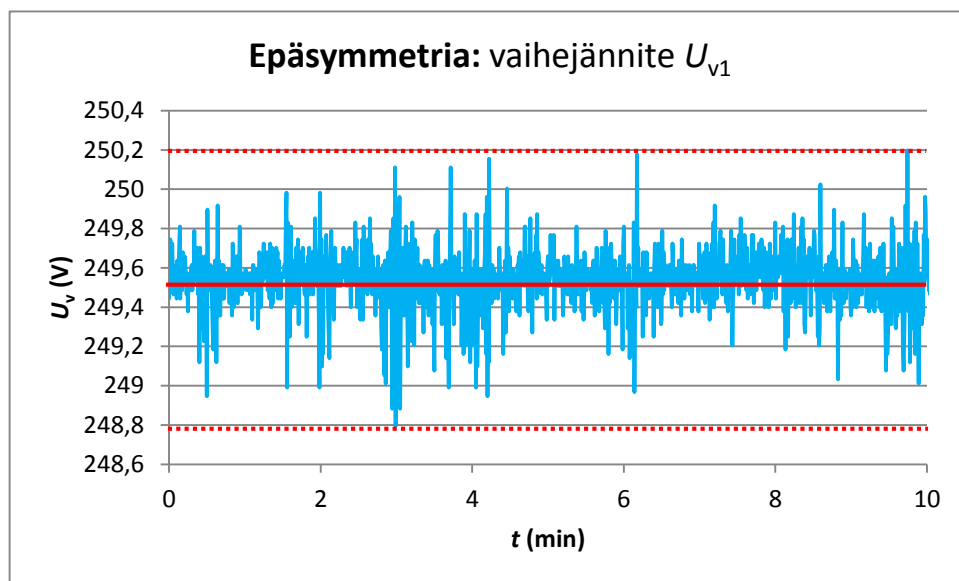


KUVIO 18. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot, kun L1-vaihetta kuormitettiin reilulla ylikuormalla ja muut vaiheet olivat kuormittamattomia

Kuviosta 18 havaitaan, että aaltomuodot poikkeavat merkittävästi sinimuotoisesta. Tämä saattaa aiheuttaa kotitalouksissa ongelmia esimerkiksi tietokoneissa, toimintavirheidensä muodossa (Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta 2002, 13). Kuviossa 18 alempi punainen pistekatkoviiva ilmaisee terveen tehollisarvoltaan 230 V:n vaihejännitteen huippuarvon eli 325 V. Kuviosta huomataan, että L3-vaiheen jännitteen huippuarvo poikkeaa 157 V:ia normaalista 325 V:sta, eli huippuarvo on 482 V. Kyseessä on merkittävät ylijännitteet, jotka saattaa vahingoittaa herkkiä pienitehoisia sähkölaitteita, ja sen seurauksena saattaa aiheuttaa esimerkiksi tulipalon. Huomionarvoista kyseisessä mittauksessa oli kuitenkin se, että varavoimakoneesta ei ulospäin huomannut millään lailla, että yhtä vaihetta kuormitettiin merkittäväällä ylikuormalla. Eli varavoimakoneen käyntiään ei poikennut normaalista, joka on tavalliselle käyttäjälle ainoa indikaattori epäterveestä käyttötilanteesta, suojalaitteen toimimisen lisäksi. Tässä tapauksessa ei suojalaite, kuitenkaan toiminut eli tavallisen käyttäjän olisi ollut siis mahdotonta havaita tämä epäterve käyttötilanne. Tässä mittauksessa siis löydettiin varavoimakoneen käyttöturvallisuusriski, johon tulisi kiinnittää erityistä huomiota kyseisen aggregaatin käytössä.

3.3.2 Maadoittamattoman varavoimakoneen yksivaihepistorasioiden epäsymmetrinen kuormittaminen

Maadoittamattomalla varavoimakoneella epäsymmetriaa tutkittiin myös yksivaiheisista pistorasioista. Mittaus tehtiin 10 minuutin kuormitusajolla, jossa L2-vaiheen, yksivaihepistorasiaa kuormitettiin 1,1 kW:n resistiivisellä kuormalla, ja mittaus tehtiin tyhjäkäyvän L1-vaiheen yksivaihepistorasiasta. Mittaus tehtiin yhdestä pistorasiasta siksi, että Fluke 435-verkkoanalysaattorissa oli vain yksi, yksivaiheinen mittauskanava. Kuviossa 19 on esitetty vaihejännitteen U_{v1} keskiarvoiset tehollisarvon 10 minuutin ajalta.

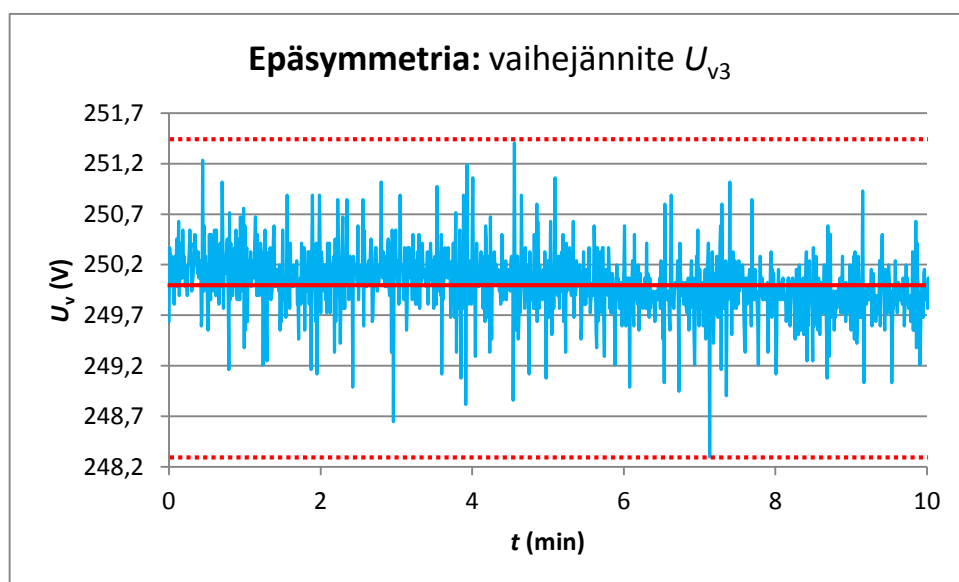


KUVIO 19. Maadoittamattoman varavoimakoneen kuormittamattoman yksivaihepistorasian vaihejännite U_{v1} , kun L2-vaiheen pistorasiaa kuormitettiin nimelliskuormalla

Kuviosta 19 havaitaan, että vaihejännite vaihtelee välillä 248,79 - 250,20 V, eli jännite ei heilahtelee merkittävästi. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 249,5 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 249,8 V. Vaikka jännitteet täyttävätkin juuri ja juuri EN 50160 vaatimukset, on kuitenkin mahdollista, että tämän suuruinen jännite saattaa vahingoittaa herkkiä pienitehoisia sähkölaitteita. Kuten tasasuuntaajilla varustettuja laitteita, joiden tasajännitevälipiirissä oleva kondensaattori kasvattaa välipiirinjännitteen huippuarvon suuremmaksi, kuin verkon jännitteen huippuarvo (Hietalahti 2011 [b], 57 - 60). Liitteessä 2 on esitetty kyseisen kuormitusajon taajuuden mittaustulos, josta havaitaan ettei siinä ole mitään poikkeavaa, eli taajuus täyttää EN 50160 vaatimukset.

3.3.3 Epäsymmetrisen kuorman syöttäminen maadoitetun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta

Maadoitetulla varavoimakoneella epäsymmetriaa tutkittiin kolmivaihepistorasiasta, johon kytkettiin paluujohtimella varustettu epäsymmetrinen kuorma. Kuormana käytettiin 990 W:n suuruista kuormaa, jonka tehokerroin oli 0,8. Kyseinen kuorma kytkettiin vaiheeseen L1, ja vaiheet L2 ja L3 olivat kuormittamattomia. Mittaus suoritettiin 10 minuutin kuormitusajolla. Kuormitusajon merkittävän tulos on esitetty kuviossa 21, jossa on esitetty vaihejännitteen U_{v3} keskiarvoiset tehollisarvot 10 minuutin kuormitusjaksolta. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien vaiheiden jännitteiden tehollisarvojen keskiarvot, kun varavoimakone oli maadoitettu ja kuormitus oli epäsymmetrinen.



KUVIO 20. Maadoitetun varavoimakoneen kuormittamattoman vaiheen vaihejännite U_{v3} , kun L1-vaiheeseen oli kytketty 100 %:n tyyppikuorma

Kuviosta 21 havaitaan, että vaihejännite vaihtelee välillä 248,30 - 251,41 V, joten jännite ei heilahtelee merkittävästi. PowerLog laskennan perusteella kaikkien mitattujen tehollisarvojen keskiarvo on 250,0 V, ja 95 % ajasta jännitteen tehollisarvojen keskiarvo on 250,5 V. Jännitteet täyttävät juuri ja juuri EN 50160 vaatimukset, on kuitenkin mahdollista, että tämän suuruinen jännite saattaa vahingoittaa herkkiä pienitehoisia sähkölaitteita. Liitteessä 2 on esitetty myös muiden vaihejännitteiden mittaustulokset, joista huomionarvoinen on vaiheen L1 jännite, jonka arvo on 217 V, mutta myös se täyttää EN 50160 vaatimukset.

Liitteen 2 taulukossa 2.9 on esitetty vaihejännitteiden yliaallot sekä THD, joista havaitaan, että 3. yliaallon osuus ylittää merkittävästi standardissa EN 50160 sallitun 3. yliaallon raja-arvon. Myös THD:n osalta ylitetään standardin raja-arvot. Liitteessä 2 on esitetty myös kyseisen kuormitusajon taajuuden mittaustulos, josta havaitaan ettei siinä ole mitään poikkeavaa, eli taajuus täyttää EN 50160 vaatimukset.

Myös maadoitetulle varavoimakoneelle tehtiin sama mittaustulos, kuin maadoittamattomalle, jossa L1-vaihetta kuormitettiin reilulla ylikuormalla (2,7 kW, $\cos\varphi$ 1) ja L2- ja L3-vaiheet olivat kuormittamattomia. Liitteessä 2 on esitetty kyseisen mittauksen aaltomuodot, jotka ovat lähes identtisen maadoittamattoman varavoimakoneen aaltomuotojen kanssa, joten voidaan siis todeta, että maadoituksella ei ole tässäkään tapauksessa vaikutusta.

3.3.4 Sekakuorman syöttäminen maadoitetun varavoimakoneen kolmivaihepis-torasiasta

Maadoittamattomalla varavoimakoneella tutkittiin myös, kuinka kolmivaiheinen seka-kuorma vaikuttaa varavoimakoneen tuottaman sähkön laatuun. Sekakuorma muodostui induktiivisesta kuormasta, epälineaarista kuormasta sekä resistiivisestä kuormasta. Kuormat jakautuivat siten, että L1-vaihetta kuormitettiin induktiivisellä kuormalla, L2-vaihetta taas epälineaarilla kuormalla ja L3-vaihetta resistiivisellä kuormalla. Liitteessä 2 on esitetty tämän mittauksen mittaustulokset, joista havaitaan, että vaihejännitteiden tasot sekä taajuus ovat standardin EN 50160 sallimissa rajoissa. Yliaaltojen sekä THD:n osalta kuitenkin ylitetään standardin asettamat raja arvot.

4 KYTKENTÄILMIÖT KUORMITUSMUUTOKSISSA

Kuormien kytkeytymisien aiheuttamia kytkentäilmiöitä, ja niiden mahdollisesti aiheuttamia käyttöturvallisuusriskejä tutkittiin kolmivaihe- ja yksivaihepistorasioista. Tällaisia vaaratilanteita ovat suuret ylijännitteet, ja sähkönsyötön ohjauksien kannalta vaaratilanteita aiheuttavat alijännitteet. Mittauksissa varavoimakonetta ei oltu maadoitettu, koska aiemmin todistettiin, että maadoituksella ei ole vaikutusta sähkön laatuun. Mittausvälineenä käytettiin Agilent Technologiesin DSO1012A -oskilloskooppia, riippuen mitattavasti tilanteesta käytössä oli, joko yksi tai kaksi oskilloskooppia samanaikaisesti. Kuormatyyppeinä käytettiin seuraavia:

- Tyypikuorma
- Yksivaiheinen uppopumppu
- Epälineaarinen kuorma
- Kolmivaiheinen oikosulkumoottori

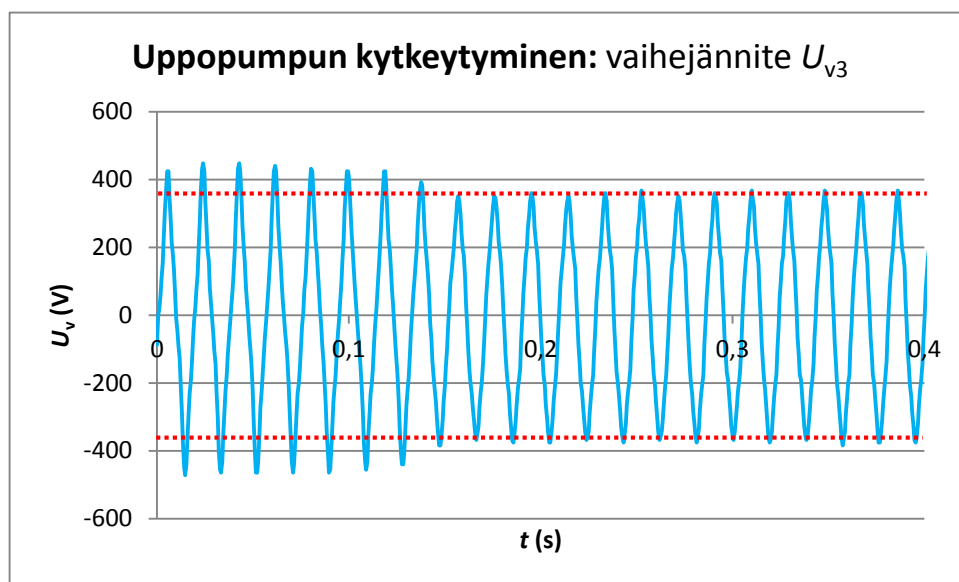
Mittauksissa tutkittiin kuormien kytkeytymisiä ja putoamisia, joista kuormien putoamisissa ei ilmennyt käyttöturvallisuusriskejä. Liitteessä 3 on esitetty kaikkien mittauksissa käytettyjen kuormalaitteiden kytkeytymisten ja putoamisten mittaustulokset.

4.1 Yksivaiheisen uppopumpun kytkeytyminen

Yksivaiheisen uppopumpun kytkeytymisen aiheuttamia kytkentäilmiöitä tutkittiin, maadoittamattoman varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta sekä yksivaihepistorasioista. Molemmissa tapauksissa käytettiin pohjakuormana 110 W:n kuormaa, joka oli 10 %:ia varavoimakoneen nimellistehosta. Kolmivaihepistorasiaan kytkeytymisessä kaikkiin vaiheisiin oli kytketty pohjakuorma, yksivaihepistorasiaan kytkeytymisessä pohjakuorma oli kytketty vaiheisiin L1 ja L2.

4.1.1 Kytkettyminen kolmivaihepistorasiaan

Uppopumppu kytkettiin vaiheeseen L1, ja vaiheissa L2 ja L3 oli 110 W:n pohjakuorma. Kuviossa 22 on esitetty tyhjäkäyvän vaiheen jännite U_{v3} , jossa havaittiin uppopumpun kytketymishetkellä merkittävin hetkellinen jännitteenousu.

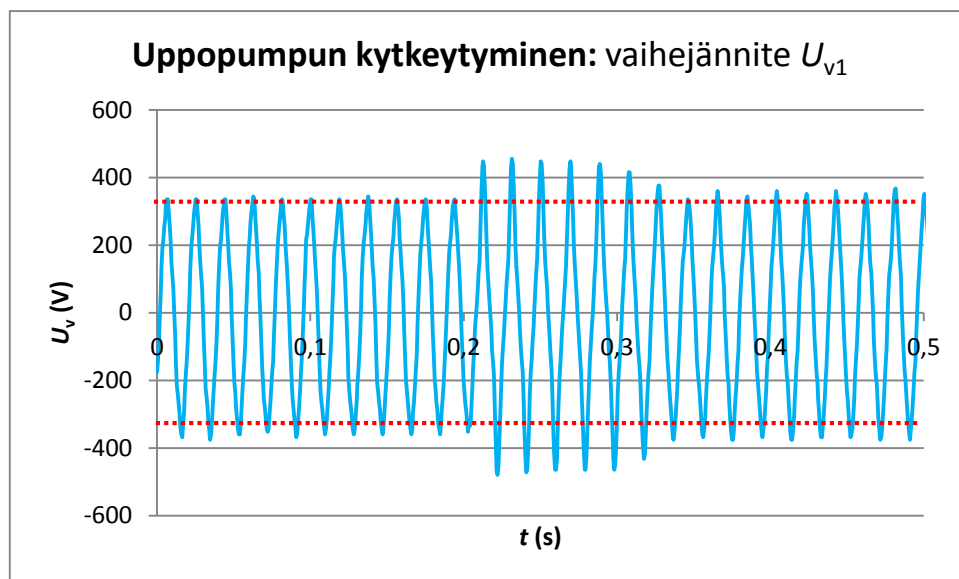


KUVIO 21. Vaihejännite U_{v3} , kun vaiheeseen L1 kytketyi yksivaiheinen uppopumppu

Kuviossa 22 on punaisilla pistekatkoviivoilla esitetty terveen, tehollisarvoltaan 230 V:n jännitteen huippuarvo. Tätä periaatetta on käytetty myös muissa tämän luvun kuvissa, lukuun ottamatta oikosulkumoottoreiden kytkentäilmiöitä, joissa pistekatkoviivat kuvaavat terveen, tehollisarvoltaan 400 V:n pääjännitteen huippuarvoa. Kuviosta 22 havaitaan, että jännitteen huippuarvo nousee kytkentähetkellä -472 V:iin eli muutos terveeseen tilanteeseen on 147 V. Tämän suuruinen ylijännitepiikki saattaa vahingoittaa herkkiä pienitehoisia sähkölaitteita. Varsinkin tasasuuntaajilla varustettuja laitteita, joiden tasajännitevälipiirissä oleva kondensaattori kasvattaa välipiirinjännitteen huippuarvon suuremmaksi, kuin verkon jännitteen huippuarvo (Hietalahti 2011 [b], 57 - 60). Voidaan siis todeta, että yksivaiheisen uppopumpun kytkettyminen saattaa aiheuttaa käyttöturvallisuusriskin. Liitteessä 3 on esitetty kaikkien vaiheiden kytkentähetken mittaustulokset.

4.1.2 Kytkeytyminen yksivaihepistorasiaan

Yksivaihepistorasioihin kytkeytyvää uppopumppua tutkittiin siten, että pumppu kytkettiin L2-vaiheen pistorasiaan ja kytkentäilmiöt tallennettiin oskilloskoopilla L1- ja L2-vaiheiden yksivaihepistorasioista. Myös tässä mittauksessa käytettiin vaiheiden pohjakuormana 110 W:n resistiivistä kuormaa. Kuviossa 23 on esitetty tyhjäkäyvän vaiheen jännite U_{v1} uppopumpun kytkeytymishetkeltä.



KUVIO 22. Kuormittamattoman yksivaihepistorasian vaihejännite U_{v1} , kun vaiheen L2 yksivaihepistorasiaan kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu

Kuviosta 23 havaitaan, että jännitteen huippuarvo nousee kytkentähetkellä -480 V:iin eli muutos terveeseen tilanteeseen on 155 V. Voidaan siis todeta, että myös tällaisessa kytkeytymistilanteessa syntyy käyttöturvallisuusriski, koska se voi aiheuttaa muiden varavoimakoneeseen kytkettyjen herkkien pienitehoisten sähkölaitteiden vahingoittumisen. Liitteessä 3 on esitetty molempien mittauksessa käytetyn yksivaihepistorasian kytkentähetken jännitteiden mittaustulokset.

4.2 Epälineaarisen kuorman kytkeytyminen

Epälineaarisen kuorman kytkeytymisellä haluttiin tutkia, kuinka kyseisen kuormatyyppin ottama epäsinimuotoinen kuormavirta vaikuttaa kytkentähetkellä varavoimakoneen jännitteisiin.

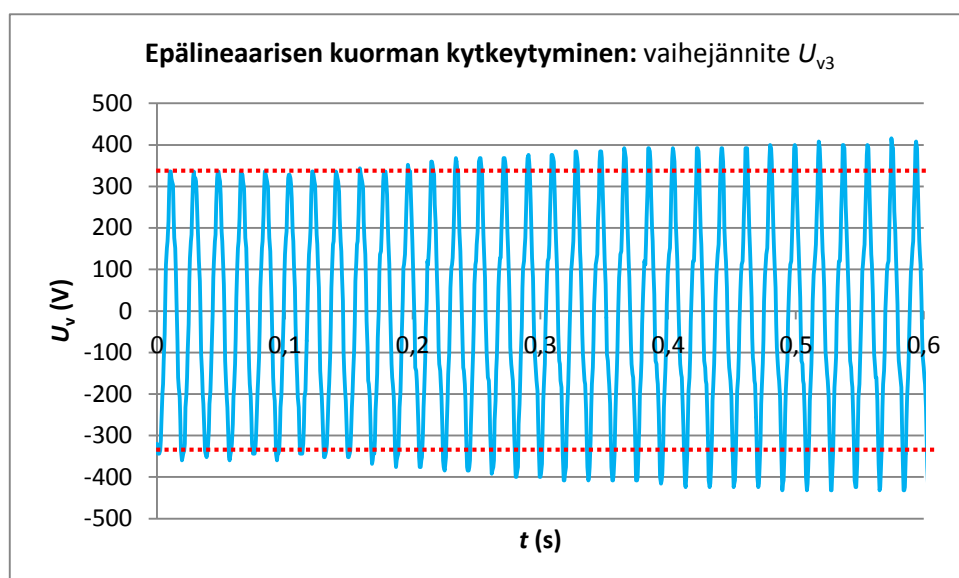
4.2.1 Kytkettyminen kolmivaihepistorasiaan

Epälineaarisen kuorman kytketymistä kolmivaihepistorasiaan tutkittiin kytkemällä 110 W:n peruskuorman rinnalle tietokoneen teholähteitä. Kyseiset teholähteet oli sijoitettu keskukseen, jossa niitä jäähdytettiin tuulettimilla. Tästä eteenpäin kyseisestä keskuksesta käytetään nimitystä keinokuormakeskus. Teholähteet ja tuulettimet oli kytketty saman pääkytkimen perään eikä erillistä tuulettimien ohjauskytkintä ollut, jolla tuuletin-kuorman vaikutus mittaustuloksiin olisi voitu eliminoida. Johtuen koulutuskäyttöön tarkoitetusta laboratorioympäristöstä, ei keinokuormakeskuksen kytkentöjä mittauksia varten muutettu. Teholähteet kuitenkin pystyttiin kytkemään erikseen päälle ilman, että kytkentähetkeen vaikuttavat käynnistyvät tuulettimet. Taulukossa 2 on esitetty kytketymishetken peruskuorma, joka sisältää keinokuormakeskuksen tuulettimet sekä symmetrisen kolmivaiheisen 110 W:n resistiivisen kuorman, jota käytettiin myös aiemmin käsitellyssä uppopumpun kytketymisessä.

TAULUKKO 2. Kytketymishetken pohjakuorma

	L1	L2	L3
P (kW)	0,22	0,13	0,14
$\cos \varphi$	1	0,75	0,76

Taulukosta 2 havaitaan, että keinokuormakeskuksen tuulettimet on sijoitettu epäsymmetrisesti eri vaiheille. Mittauksessa peruskuorman rinnalle, vaiheeseen L1 kytkettiin samanaikaisesti viisi tietokoneen teholähdettä. Kuviossa 24 on esitetty vaihejännite U_{V3} , jossa havaittiin merkittävin muutosilmiö.

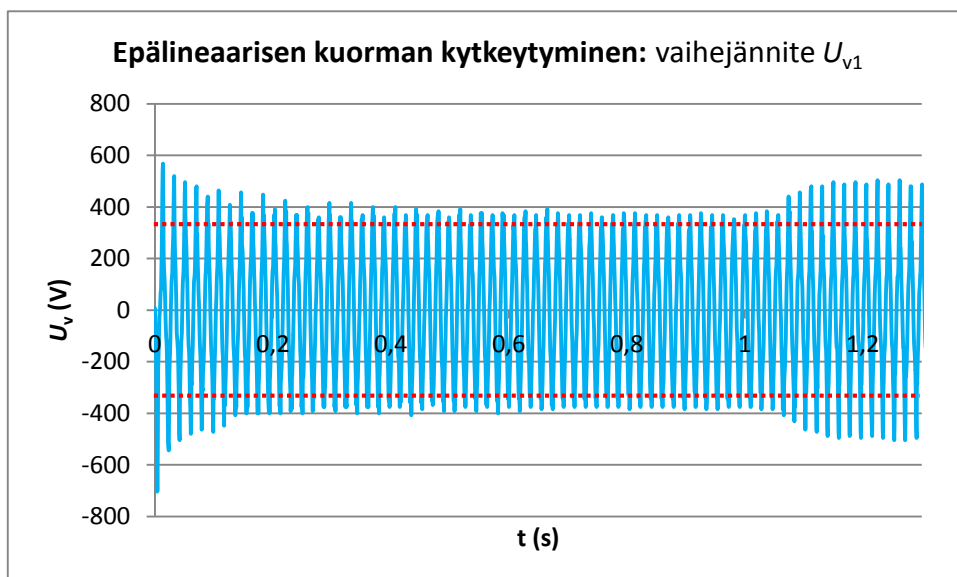


KUVIO 23. Kuormittamattoman vaiheen jännite U_{v3} , kun vaiheeseen L1 kytketty epälineaarinen kuorma

Kuviosta 24 havaitaan, että jännitteen huippuarvo nousee kytkentähetken jälkeen suurimmillaan -480 V:iin eli muutos terveeseen tilanteeseen on 155 V:ia. Huippuarvo on suurempi jännitteen negatiivisella puolijaksolla, kuin positiivisella puolijaksolla. Hetkellisiä jännitteenousuja ei siis synny, vaan tyhjäkäyvän vaiheen jännite asettuu lähes vakiona pysyvään jännitearvoon. Voidaan siis todeta, että myös tällainen kytketymistilanne aiheuttaa käyttöturvallisuusriskin, jos varavoimakoneeseen on samanaikaisesti kytkettynä herkkiä pienitehoisia sähkölaitteita. Liitteessä 3 on esitetty kaikkien vaiheiden kytkentähetken jännitteet.

4.2.2 Kytketyminen yksivaihepistorasiaan

Vaiheen L2 yksivaiheiseen pistorasiaan kytkettiin myös viisi tietokoneen tehölähdettä, ja oskilloskoopilla tallennettiin aaltomuodot, kyseisestä vaiheesta sekä vaiheesta L1. Erona aiempaan mittaukseen, tässä mittauksessa yksivaiheisen 110 W:n resistiivisen kuorman rinnalle kytkettyivät samanaikaisesti viisi tehölähdettä sekä keinokuormakeskuksen tuulettimet. Eli kuormitus kytkettiin päälle keinokuorman pääkytkimestä, eikä teholähteiden erillisistä ohjauskytkimistä. Kuviossa 25 on esitetty tyhjäkäyvän pistorasian vaihejännite U_{v1} .



KUVIO 24. Kuormittamattoman yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun vaiheeseen L2 kytkeytyi samanaikaisesti epälineaarinen kuorma sekä keinokeskuksen tuulettimet

Kuviosta 25 havaitaan, että kytkeytymishetkellä jännitteen huippuarvo on -700 V. Kyseessä on merkittävä ylijännite, joka erittäin suurella todennäköisyydellä hajottaa pieni-tehoisia herkkiä sähkölaitteita, ja näin synnyttää vaaran käyttöturvallisuudelle. Kotitalouksissa tilanteita, joissa samanaikaisesti kytkeytyy näin suuritehoinen epälineaarinen kuorma ja tuuletin, ei esiinny. Mittauksella kuitenkin osoitettiin, että merkittävä käyttöturvallisuusriski syntyy, kun tutkittuun varavoimakoneeseen kytketään tällainen kuorma.

4.3 Tyypikuorman kytkeytyminen kolmi- ja yksivaihepistorasioihin

Liitteessä 3 on esitetty mittaustulokset tilanteista, joissa 100 %:n tyypikuorma kytkeytyy kolmivaihe- sekä yksivaihepistorasioista. Kaikissa mittauksissa on käytetty pohjakuormana 110 W:n kuormaa, kuten uppopumpun ja epälineaarisen kuorman kytkeytymisissä. Tyypikuorman kytkeytymisien mittaustuloksista havaitaan, että ne eivät aiheuta käyttöturvallisuusriskejä.

4.4 Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin kytkeytyminen

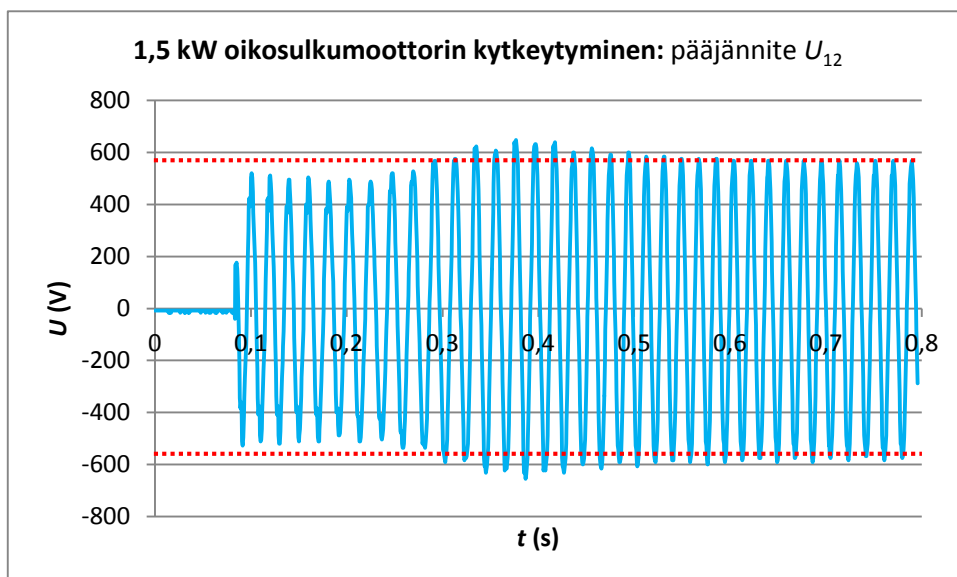
Kytkemällä varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan erisuuruisia kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita, tutkittiin niiden aiheuttamia kytkentäilmiöitä. Sekä, kuinka suuria oikosulkumoottoreita tutkitulla 3,6 kW:n aggregaatilla voidaan käynnistää. Mittauksissa käytettiin 1,5 kW, 2,2 kW sekä kahta rinnakkain kytkettyä 1,5 kW moottoria, jotka vastasivat 3 kW:n moottoria. Moottoreita kuormitettiin niiden nimellismomenteillaan. Erityisenä mielenkiinnon kohteena olivat 1,5 kW:n ja 2,2 kW:n oikosulkumoottorit, koska niiden tehot vastasivat maalämpöpumpuissa käytettyjen kompressorien tehoja (Oilon maalämpöesite 2013, 3). Näiden moottoreiden käynnistyksillä selvitettiin siis samalla voidaanko, tutkittua varavoimakonetta käyttää maalämpöpumpun syöttämiseen.

4.4.1 1,5 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen

Liitteessä 3 on esitetty 1,5 kW:n oikosulkumoottorin kytkeytymisen mittaustulokset, joista havaitaan, että tutkittava aggregaatti kykenee käynnistämään kyseisen moottorin ongelmitta. 1,5 kW oikosulkumoottorin kytkeytyminen aiheuttaa hetkellisen jännitteenousun, mutta tästä ei aiheudu käyttöturvallisuusriskiä

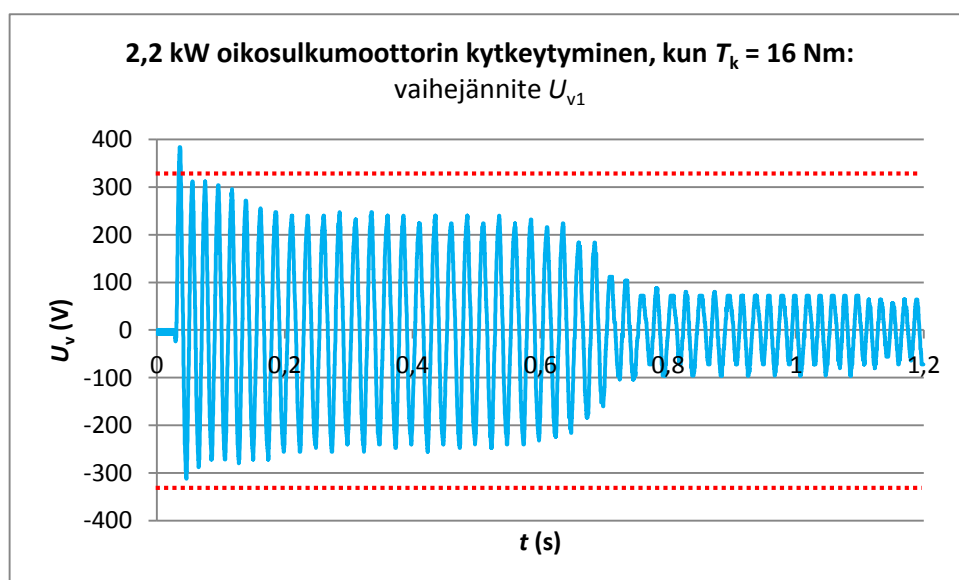
4.4.2 2,2 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen

Kytkemällä varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan 2,2 kW:n oikosulkumoottori tutkittiin kykeneekö aggregaatti käynnistämään kyseisen tehoista moottoria. Kuviossa 26 on esitetty käynnistyvän 2,2 kW:sen oikosulkumoottorin pääjännite U_{12} , kun kuormamomentti oli nimellinen (15 Nm).



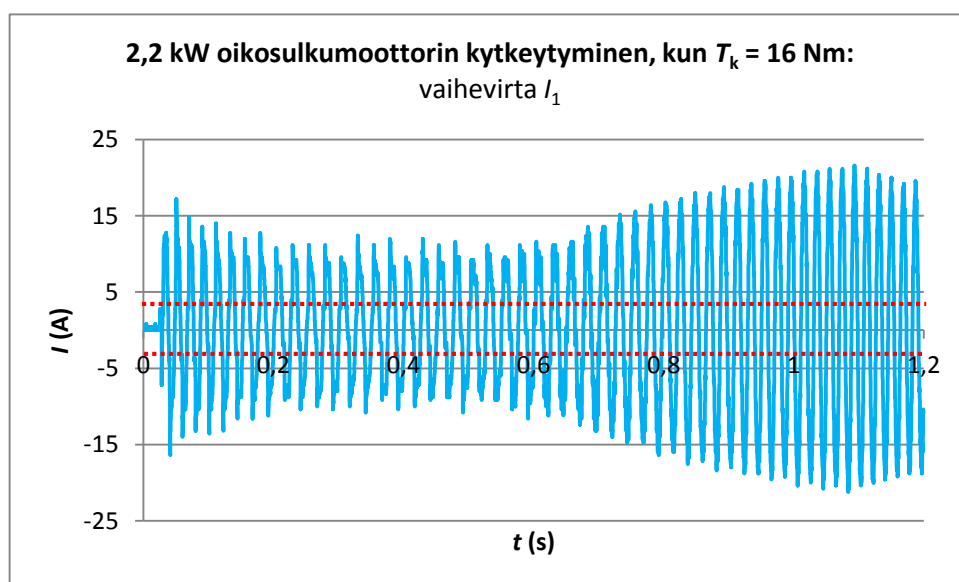
KUVIO 25. Varavoimakoneen pääjännite U_{12} , kun 2,2 kW:n nimelliskuormitettu kolmivaiheinen oikosulkumoottori kytkeytyy kolmivaihepistorasiaan

Kuviosta 26 havaitaan, että käynnistyshetkellä varavoimakoneen liitinjännite putoaa, joka johtuu oikosulkumoottorin ottamasta suuresta käynnistysvirrasta. Käynnistyshetkellä oikosulkumoottori ottaa noin 5 - 7-kertaisen virran verrattuna nimellisvirtaan I_N . Kuvasta havaitaan, että jännitteen jatkuvan tilan jännitteen huippuarvo asettuu pistekatkoviivalle, eli terveeseen arvoon. Mittausten yhteydessä kuitenkin havaittiin, että käynnistettäessä oikosulkumoottori vain hieman nimellistä suuremmalla kuormamomentilla (16 Nm), jää moottori käynnistytksen jälkeen pyörimään alinopeudella. Joka johtuu moottorin magneettikentän, yliaaltojen synnyttämistä yliaaltomomenteista, jotka ovat tasapainossa kuormamomentin kanssa, jolloin kone jää pyörimään suurella jättämällä eli alinopeudella (Hietalahti 2013, 27). Kyseisessä kuormitustilanteessa moottori otti myös suurta kuormitusvirtaa, joka aiheutti sen, että varavoimakoneen käynti muuttui epänormaaliksi. Tämä ilmeni aggregaatin normaalia voimakkaampana tärinänä sekä normaalia poikkeavana käyntiääninä. Kuviossa 27 on esitetty vaihejännite U_{v1} , kun moottoria kuormitettiin 16 Nm kuormamomentilla.



KUVIO 26. Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneeseen kytkeytyy lievästi ylikuormitettu 2,2 kW:n oikosulkumoottori

Kuviosta 27 havaitaan, että kyseisessä mittaustilanteessa varavoimakoneen vaihejännite putoaa merkittävästi. Jos varavoimakoneen syöttöön olisi kytketty muita sähkölaitteita, aiheuttaisi näin merkittävä alijännite niiden sammumisen. Kuviossa 28 on esitetty vaihevirta I_1 , kun moottoria kuormitettiin 16 Nm kuormamomentilla.



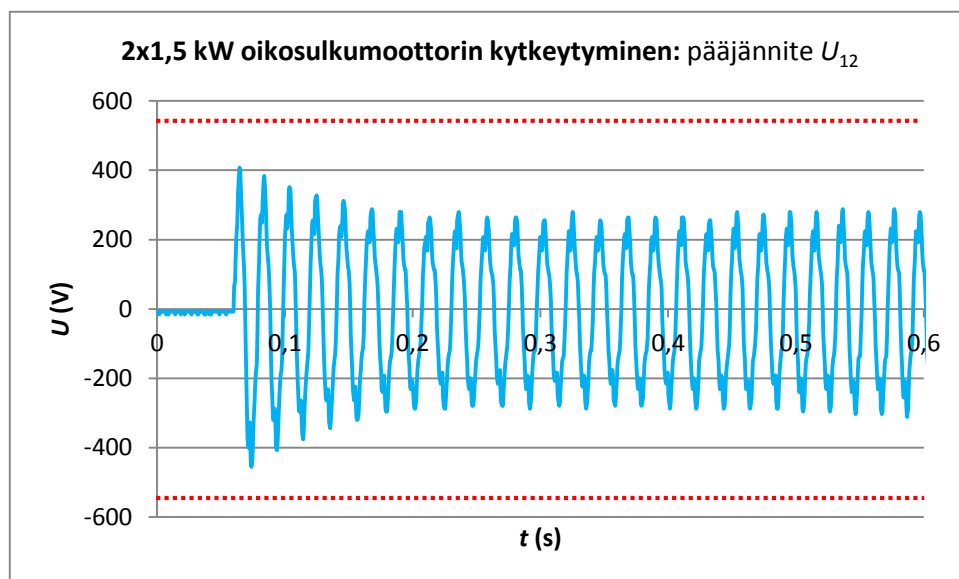
KUVIO 27. Vaihevirta I_1 , kun varavoimakoneeseen kytkeytyy lievästi ylikuormitettu 2,2 kW:n oikosulkumoottori

Kuviossa 28 on pistekatkoviivalla esitetty moottorin nimellisvirta, joka on 4,3 A. Kuvasta havaitaan, että käynnistyshetken jälkeen moottori ottaa nimellisvirtaan verrattuna

moninkertaista kuormitusvirtaa. Kyseinen kuormitusvirta on myös moninkertainen verrattuna varavoimakoneen nimellisvirtaan, joka on 5,2 A. Tästä syystä varavoimakoneen tahtigeneraattorin sekä oikosulkumoottorin staattorikäämit ylikuumenevat, jos varavoimakoneen suojalaitteet eivät katkaise sähkönsyöttöä. Lämpenemisen seurauksena molempien laitteiden staattorikäämieneristeet saattavat sulaa, josta aiheutuvat käämioikosulut tuhoavat molemmat laitteet, ja aiheuttavat mahdollisesti myös tulipalon. Tämä on merkittävä käyttöturvallisuusriski, johon tulee kiinnittää erityishuomiota kyseisen varavoimakoneen käytössä.

4.4.3 3 kW:sen oikosulkumoottorin kytkeytyminen

Kuviossa 29 on esitetty nimelliskuormitetun 3 kW:sen oikosulkumoottorin kytkentähetken aikainen pääjännite U_{12} .



KUVIO 28. Pääjännite U_{12} , kun 3 kW:n nimelliskuormitettu kolmivaiheinen oikosulkumoottori kytkeytyy kolmivaihepistorasiaan

Kuviosta 29 havaitaan, että käynnistyshetkellä varavoimakone tuottaa alijännitettä, ja käynnistystilanteen jälkeen jännite putoaa entisestään. Lopulta jännitteen huippuarvo asettuu 300 V:n tasolla. Mittaustulos osoittaa, että tutkitulla aggregaatilla ei voida käyttää tämän suuruista oikosulkumoottoria.

5 VIKATILANTEET

Maadoittamattoman varavoimakoneen syöttämän verkon eri kohtiin tehtiin 1-, 2- ja 3-vaiheisia oikosulkuja. Kyseiset kohdat olivat lähellä kolmivaihepistorasian napoja, sekä 35 m pitkän ja poikkipinta-alaltaan $1,5 \text{ mm}^2$ kaapelin päässä. Lähellä kolmivaihepistorasian napoja tapahtuvilla oikosuluilla mallinnettiin keskuksella tapahtuvaa oikosulkua. Pitkän kaapelin päässä tapahtuvilla oikosuluilla taas mallinnettiin, kiinteistön pistorasiaan kytketyn sähkölaitteen aiheuttamaa oikosulkua.

Oikosulkutilanteilla oli tarkoitus selvittää toimiiko varavoimakoneen oma johdonsuojakatkaisija ja onko laukaisuaika riittävän pieni. Standardin SFS 6000-4-41 mukaan, enintään 32 A ylivirtasuojilla laukaisu on tapahduttava alle 0,4 sekunnissa (SFS-käsikirja 600-1, 2012, 92). Oikosulkumittauksilla oli myös tarkoitus selvittää, kuinka suurta oikosulkuvirtaa varavoimakone kykenee syöttämään oikosuluissa. Oikosulkuvirtamittausten tulokset on esitetty liitteessä 4, joista on koottu oikosulkuvirtojen huippuarvot sekä laukaisuaajat taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. Oikosulkumittausten tulokset

Oikosulkutilanne	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)	laukaisuaika (s)
Oikosulku keskuksella (1~)	134	0	0	< 0,1
Oikosulku keskuksella (2~)	102	106	0	< 0,1
Oikosulku keskuksella (3~)	102	124	92	< 0,1
Oikosulku 35 m pitkän kaapelin päässä (1~)	112	0	0	< 0,1
Oikosulku 35 m pitkän kaapelin päässä (2~)	94	90	0	< 0,1
Oikosulku 35 m pitkän kaapelin päässä (3~)	96	108	92	< 0,1

Tutkitussa varavoimakoneessa suojalaitteena toimi 10 A johdonsuojakatkaisija, jonka laukaisukäyrä oli C. Käsikirjan D1-2012 mukaan, mitatun oikosulkuvirran arvon tulee C10-johdonsuojakatkaisijalle olla 125 A, jotta syötön automaattinen poiskytkentä toimii riittävän nopeasti (D1-2012, 2012, 93). Taulukosta 3 havaitaan, että oikosulkuvirrat ovat 100 A luokkaa, ja ainoastaan keskuksella tapahtuvan yksivaiheisen oikosulun synnyttämä oikosulkuvirta ylittää D1-2012 esitetyn 125 A vaatimuksen. Taulukosta 3 kuitenkin havaitaan, että kaikki mitatut laukaisuaajat ovat alle 0,1 sekuntia, jolloin laukaisuaikojen osalta alitetaan D1-2012, 0,4 sekunnin vaatimus. Mittaustulokset osoitta-

vat, että syötön automaattinen poiskytkentä tapahtuu riittävän nopeasti, vaikka oikosulkuvirran arvot eivät olekaan vaatimusten mukaisia.

Tutkimuksissa havaittiin, että varavoimakoneen pistorasioiden suojaus on toteutettu varsin poikkeuksellisesti. Aggregaatin suojalaitteena toimiva kolmivaiheinen C10-johdonsuojakatkaisija, toimii ylikuormitus- sekä oikosulkusuojana yksivaiheisille pistorasioille. Kolmivaihepistorasiaa kyseinen johdonsuojakatkaisija taas suojaa oikosuluilta, mutta ylikuormitukselta ei. Tämä todettiin, kun varavoimakoneen pistorasioista otettiin 15 A kuormitusvirtaa, joka on 1,5-kertainen suojalaitteen nimellisvirtaan. Laukaisun on tällöin tapahduttava 40 sekunnissa, C-käyrän johdonsuojakatkaisijalla (ABB moduulikojeet, 138). Yksivaihepistorasiaa kuormitettaessa laukaisu tapahtui alle 40 sekunnissa, mutta kolmivaihepistorasiaa yksivaiheisesti kuormitettaessa laukaisua ei tapahtunut lainkaan. Tämä osoittaa sen, että kyseisessä varavoimakoneessa kolmivaihepistorasiaa ei siis suojata ylikuormitukselta johdonsuojakatkaisijalla.

Tutkimuksissa määritettiin myös, kuinka suuri kuorma varavoimakoneeseen voidaan kytkeä. Suurin kuorma, jota tutkitulla varavoimakoneella voidaan syöttää, on resistiivinen 6,9 kW:n kuorma. Tätä suuremmalla kuormituksella varavoimakoneen jännitteet romahtavat, jonka seurauksena myös virrat ja tehot romahtavat. Tämä ylikuormitus oli havaittavissa myös, merkittävästi normaalista poikkeavana käyntiäänenä. Tutkitun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian ylikuormitussuojaus on siis toteutettu, aggregaatin fysikaalisilla rajoitteilla.

Maadoittamattoman varavoimakoneen syöttämään verkkoon kytkettiin myös vikavirtasuojakytkin, jonka avulla voitiin todeta, että jännitteisten vaihejohtimien ja maan välillä ei kulje vuotovirtoja. Painettaessa vikavirtasuojan testauspainiketta, ei tapahtunut suojaustoimintoa eli vuotovirtoja ei esiintynyt.

6 VARAVOIMALAITEVALMISTAJAN OHJEET KÄYTTÄJÄLLE

Käyttöturvallisuuteen kuuluu olennaisena osana myös, kuinka varavoimakoneenvalmistaja ohjeistaa käyttäjää laitteen käytössä. Valmistaja tekee heti ohjekirjan alussa selväksi, että se on vapautettu vastuusta, jos käyttöohjetta laiminlyödään. Samaisella sivulla kerrotaan myös, että generaattoria ei saa liittää yleiseen sähköverkkoon, sekä epäasianmukaisen liitännän aiheuttamasta tulipalovaarasta että omaisuus- ja henkilövahingoista (Stanley SG 5500 käyttöohje, 92.)

Käyttöohjeessa ilmoitetaan varavoimakoneen sallituiksi käyttöympäristön lämpötila-alueeksi -10 - +40 °C (Stanley SG 5500 käyttöohje, 94). Suomessa sähkökatkot ajoittuvat yleisimmin talveen, jolloin pakkasta voi olla enemmän kuin -10 °C. Tästä johtuen käyttäjä joutuu rikkomaan kovalla pakkasella valmistajan antamaa ohjeistusta, jolloin valmistaja ei enää ota vastuuta mahdollisesti syntyvistä vahingoista. Kuluttajan on siis oltava tarkkana ostaessaan varavoimakonetta, jotta se vastaa hänen tarpeitaan ja käyttöympäristöään.

Varavoimakoneen maksimitehoksi on ilmoitettu 5,5 kW, jolla konetta saa valmistajan mukaan käyttää tilapäisesti. Valmistaja ei kuitenkaan määrittele minkäänlaista aikaa, kuinka pitkään tämä tilapäinen käyttö saa kestää. Sen valmistaja kuitenkin ilmoittaa samassa yhteydessä, että kone on pysäytettävä hetkeksi maksimiteholla käyttämisen jälkeen, ylikuumenemisen estämiseksi (Stanley SG 5500 käyttöohje, 96.) Maallikolle ei kuitenkaan välttämättä ole selvää, kuinka pitkään varavoimakonetta saa kuormittaa maksimiteholla. Maallikolle tilapäisyys saattaa tarkoittaa esimerkiksi tuntia, vaikka todellisuudessa tilapäiskäyttö saisi kestää vain noin 2 - 5 minuuttia. Kuormitettaessa varavoimakonetta tunnin verran, maksimikuormalla saattaa siitä aiheutua tulipalo, jos varavoimakone ehtii tänä aikana kuumentua liikaa.

Stanley SG 5500-varavoimakoneen käyttöohjeessa on myös muutama varsin mielenkiintoinen ohjeistus käyttäjälle. Seuraavassa on esitetty niistä kaksi:

- ”Generaattorin voimanlähteenä on poltto, joka tuottaa kuumuutta pakokaasua poistonauloilla (virtsakivistä vastakkaisella puolella) ja pakotteissa. Sen vuoksi

näitä pintoja ei pidä koskettaa palovammoja välttämiseksi.” (Stanley SG 5500 käyttöohje, 94.)

- ”Teknisissä tiedoissa mainitut äänitehosteina (LAIN) ja äänenpainot (LÄMPIÄMISESTÄ) arvot ovat päästöjä eivätkä välttämättä luotettavia työpaikan arvoja. Koska emissio- ja omaisi korreloi, nämä arvot eivät ole luotettava perusta päätettäessä mahdollisesti tarvittavista lisävaatimus. Tekijöihin, jotka vaikuttavat todellisen käyttämän immuunikatoon, sisältyy työpaikan ominaisuudet, muut äänilähteitä jne., lähellä olevien koneiden lukumäärä ja muut prosessit sekä aika, jonka käyttäjä on altistunut melulla. Sallittu omaisi voi myös vaihdella maittain. Siitä huolimatta käyttäjä kykenee näiden tietojen perusteella arvioimaan paremmin työhön liittyviä riskejä.” (Stanley SG 5500 käyttöohje, 94.)

Ensimmäisen ohjeen kirjoitusvirheet saattavat aiheuttaa käyttöohjeen lukijalle hilpeyttä, koska ne eivät liity mitenkään varavoimakoneen käyttöön. Englanninkielisestä käyttöohjeesta kuitenkin selviää, että sanalla ”virtsakivi” tarkoitetaan pistorasiaa, ja sanalla ”pakote” tarkoitetaan pakoputkea (Stanley SG 5500 käyttöohje, 10).

Toinen ohje taas on erittäin vaikeaselkoisesti ilmaistu, jonka vuoksi käyttäjän on mahdoton ymmärtää mitä tällä ohjeistuksella tarkoitetaan ilman, että hän perehtyy käyttöohjeen englanninkieliseen versioon. Suluissa esitetyllä sanalla ”LAIN” tarkoitetaan lyhennettä LWA ja sanalla ”LÄMPIÄMISESTÄ” tarkoitetaan lyhennettä LWM (Stanley SG 5500 käyttöohje, 10, 94). Käyttöohjeenlukijaa saattaa hämmentää myös se, että suomenkielisen käyttöohjeen teknisissä tiedoissa mainitaan lyhenne LWA, mutta käyttöohjeen yleisissä turvallisuusohjeissa lyhenne onkin muutettu sanaksi ”LAIN”. Käyttöohjeen englanninkielisessä versiossa, kuitenkin käytetään ainoastaan lyhennettä LWA, niin yleisissä turvallisuusohjeissa kuin teknisissä tiedoissakin (Stanley SG 5500 käyttöohje, 10, 12, 94, 96.)

Nämä virheet saattavat aiheuttaa vaaratilanteita käyttäjälle, koska lukiessaan käyttöohjetta, ja huomatessaan nämä kuriositeetit, hänen luottamuksensa koko käyttöohjekirjan todenperäisyyteen saattaa kadota. Jonka vuoksi hänellä voi jäädä lukematta loput käyttöohjeesta, jossa kerrotaan esimerkiksi, mitä on tehtävä ennen käyttöönottoa ja kuinka varavoimakonetta tulee huoltaa.

7 POHDINTA

7.1 Varavoimalaitteen kytkeminen kiinteistön sähköverkkoon

Tutkitun Stanley SG 5500-aggregaatin käyttöohjeessa kielletään kytkemästä, kyseistä varavoimakonetta yleiseen sähköverkkoon, vastuunvapautuksen uhalli. Kuitenkin jos maallikko hankkii varavoimalaitteen tarkoituksenaan, syöttää kiinteistönsä sähköverkkoa sähkökatkojen aikana. On hänen pyydettävä sähköalan ammattilaista tekemään tämä muutostyö hänen kiinteistönsä sähköverkkoon. Tästä voi syntyä ongelmallinen tilanne, jos sähköasentaja asentaa varavoimalaitteen tilattuun kohteeseen, ja asennuksen jälkeisestä varavoimalaitteen käyttötilanteesta syntyy henkilö- tai omaisuusvahinkoja. Kuinka tällaisessa tilanteessa määritellään, kuka on vastuussa? Maallikko, joka tietäen tai tietämättä valmistajan kiellot, asennutti varavoimalaitteen kiinteistönsä sähköverkkoon. Vai onko sähköasentaja vastuussa, jonka olisi pitänyt varmistaa onko kyseistä varavoimalaitetta turvallista asentaa kiinteistön sähköverkkoon. Entä laitteen myyjä tilanteessa, jossa maallikko on kysynyt ostaessaan varavoimakonetta, voiko sillä syöttää kiinteää sähköverkkoa. Tähän myyjä on vastannut ilman parempaa tietoaan, että se on mahdollista. On siis hyvin hankala tietää, kuka on vastuussa tällaisessa tilanteessa.

7.2 Tutkitun varavoimakoneen sähkön laatu

Tutkimustuloksista havaittiin, että vaihejännite sisälsi yliaaltoja, joista merkittävin osa oli 5. yliaalto. Huolimatta varavoimakoneen tuottaman vaihejännitteen säröytymisestä, se oli kuitenkin symmetrisesti kuormitettuna standardin EN 50160 asettamissa rajoissa. Epäsymmetrisillä kuormilla taas, oli havaittavissa merkittävää vaihejännitteen säröytymistä. ST-kortin 52.40 mukaan generaattorien rakennestandardit vaativat ainoastaan pääjännitteeltä riittävän pientä THD-arvoa, ja vaihejännitteelle taas ei ole esitetty särökerroin vaatimuksia (ST-kortti 52.40 2012, 2). Tutkimuksissa ei kuitenkaan mitattu pääjännitteen särökertoimia, joten tutkimuksilla ei voitu osoittaa täyttääkö tutkittu aggregaatti generaattorien rakennestandardin vaatimukset, THD:n osalta.

7.3 Oikosulkumoottorin mitoitus varavoimalaitteeseen

ST-kortin 52.40 mukaan käynnistettäessä suoralla käynnistyksellä oikosulkumoottoria varavoimakoneella, saisi oikosulkumoottorin nimellisvirta olla maksimissaan 10 % varavoimakoneen nimellisvirrasta (ST-kortti 52.40 2012, 5). Analysoitaessa oikosulkumoottorien kytketymisien aiheuttamia kytkentäilmiöitä havaittiin, että tutkitulla varavoimakoneella, jonka nimellisvirta oli 5,2 A pystyttiin käyttämään 1,5 kW:n oikosulkumoottoria, jonka nimellisvirta oli 3,5 A. Käytetyn moottorin nimellisvirta oli siis huomattavasti suurempi, kuin 10 %:ia varavoimakoneen nimellisvirrasta. Olisi kuitenkin tehtävä lisätutkimuksia muiden valmistajien kolmivaiheisilla varavoimakoneilla, jotta voitaisiin varmuudella osoittaa, että ST-kortin 52.40 10 %:n ohjearvoa voitaisiin kasvattaa.

7.4 Varavoimakoneen suojalaitteet

Tutkimuksissa havaittiin, että tutkitun varavoimakoneen johdonsuojakatkaisija toimi ylikuormitus- ja oikosulkusuojana yksivaihepistorasioille, ja ainoastaan oikosulkusuojana kolmivaihepistorasialle. Varavoimakonetta voidaan siis ylikuormittaa kolmivaihepistorasiasta niin kauan, kunnes aggregaatin fysikaaliset rajoitteet romauttavat jännitteet. Tämä on käyttöturvallisuusriski, koska ylikuormitus lämmittää varavoimakoneen sisäisiä komponentteja ja voi aiheuttaa esimerkiksi tulipalon.

Tutkittaessa kuormien epäsymmetrisyyden vaikutuksia varavoimakoneen tuottaman sähkön laatuun havaittiin, että kuormitettaessa yhtä vaihetta nimelliskuormalla, muiden vaiheiden jännitteet kasvoivat merkittävästi. Vaikka kuormittamattomien vaiheiden jännitteet pysyivätkin juuri ja juuri standardin EN 50160 asettamissa raja-arvoissa. On mahdollista, että jonkin toisen valmistajan varavoimakoneessa vaihejännitteet ylittävät raja-arvot, jolloin syntyy käyttöturvallisuusriski. Jotta jännitteiden liiallinen kasvu voitaisiin estää, tulisi tutkitun varavoimakoneen syöttämä sähköverkko varustaa ylijännitesuojilla.

Käynnistettäessä ylikuormitettua 2,2 kW:n ja nimelliskuormitettuja 2x1,5 kW:n oikosulkumoottoreita havaittiin, että jännitteet putosivat hyvin merkittävästi. Jotta tällais-

ten käyttötilanteiden aiheuttamat vaaratilanteet voitaisiin estää tulisi tutkitun varavoimakoneen syöttämä verkko varustaa erillisillä ylikuormitus- tai alijännitesuojilla.

Oikosulkuvirtamittausten tuloksista havaittiin, että ne olivat alle D1-2012 esitettyjen vaatimusten, C10-johdonsuojille. Laukaisuaikat kuitenkin alittivat D1-2012 asettaman 0,4 sekunnin rajan, 10 A johdonsuojille. Tutkitun varavoimakoneen tuottama oikosulkuvirta siis kykenee katkaisemaan oikosulun riittävän pienessä ajassa, vaikka mitatut virran arvot alittavatkin D1-2012 esitetyt vaatimukset. Se, että onko varavoimakoneen tuottama oikosulkuvirta riittävän suuri, aiheuttamaan oikosulkusuojan riittävän nopean toimimisen, tulisi aina tutkia varavoimakonekohtaisesti.

Varavoimakoneiden käyttöohjeistukseen tulisi myös kiinnittää huomiota, koska tutkimuksissa käytetyn aggregaatin käyttöohjeista ilmeni ainoastaan, että koneen johdonsuojakatkaisija toimii ylikuormitussuojana yksivaihepistorasioille. Käyttöohjeissa ei siis kerrottu sen toimivan oikosulkusuojana yksivaihepistorasioille ja kolmivaihepistorasialle. Käyttöohjeessa myös ilmoitettiin, että varavoimakonetta saa ylikuormittaa tilapäisesti, mutta minkäänlaista aikarajaa tilapäisyyden kestolle ei annettu. Käyttöohjeen suomenkielisestä versiosta löydettiin myös ristiriitaisuuksia sekä kirjoitusvirheitä.

LÄHTEET

ABB. Moduulikojeet. Luettu 11.4.2014

[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/e8162b23a3cd9e91c12571e2002b95a8/\\$file/moduulikojeet.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/e8162b23a3cd9e91c12571e2002b95a8/$file/moduulikojeet.pdf)

Hietalahti, L. Tarkka, P. 2006. Piirianalyysi 2. 2.painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

[a] Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1.painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

[b] Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1.painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. 1.painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Inkinen, P. Manninen, R. Tuohi, J. 2009. 2.–3.painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Karhima, M. 2012. Autotekniikka 1. 1.painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Oilon. 2013. Maalämpöesite. Luettu 11.4.2014.

<http://oilon.com/uploadedFiles/OilonHome/Materials/Oilon%20maalämpöesite%20140213.pdf>

Sesko ry. 2010. SFS-EN 50160 yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4.painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS Ry.

Sesko ry. 2012. SFS-käsikirja 600-1 sähköasennukset osa1: SFS 6000 pienjännitesähköasennukset. 1.painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS Ry.

Stanley. Stanley SG 5500 käyttöohje. Luettu 11.4.2014

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2013. D1-2012 käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 20.painos. Espoo: Sähköinfo Oy

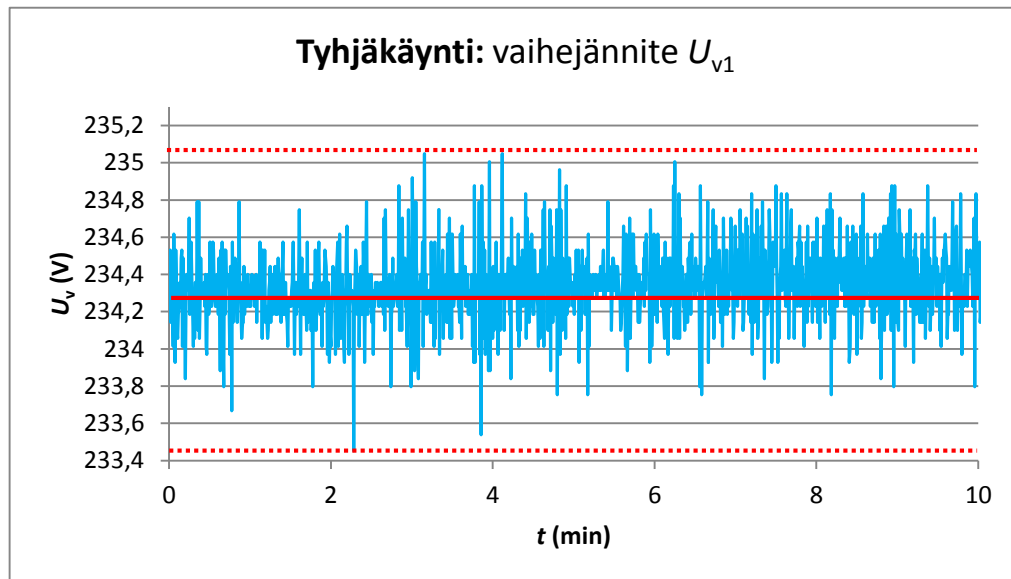
Sähkötieto ry. 2012. ST 52.40 Siirrettävän, pienjännitteisen moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon. Espoo: Sähköinfo Oy

Säty. 2002. Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta. 1.painos. Luettu 12.4.2014.

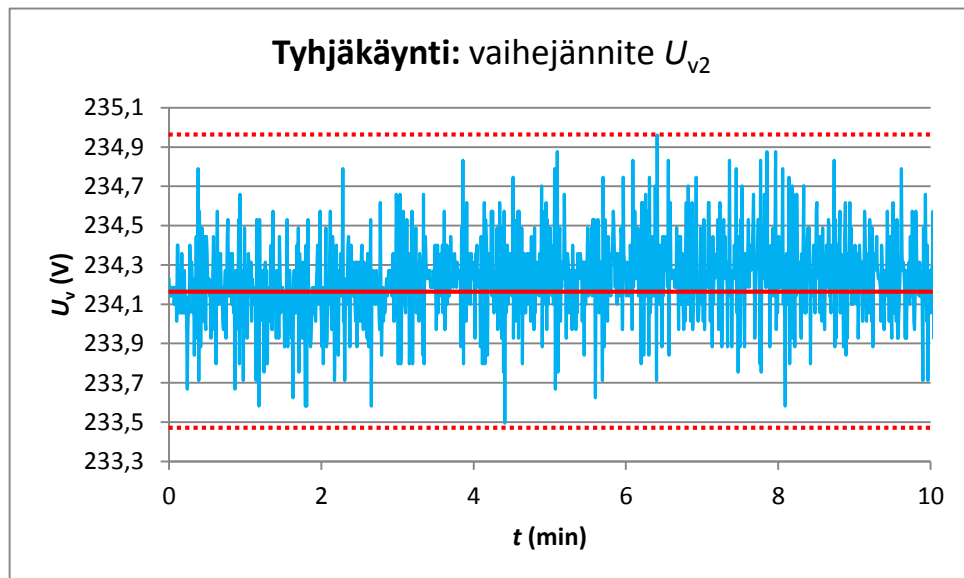
http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko_ja_hissit/sahkopeto/s%C3%A4hkiset%20paloriskit%20ja%20niiden%20hallinta.pdf

LIITTEET

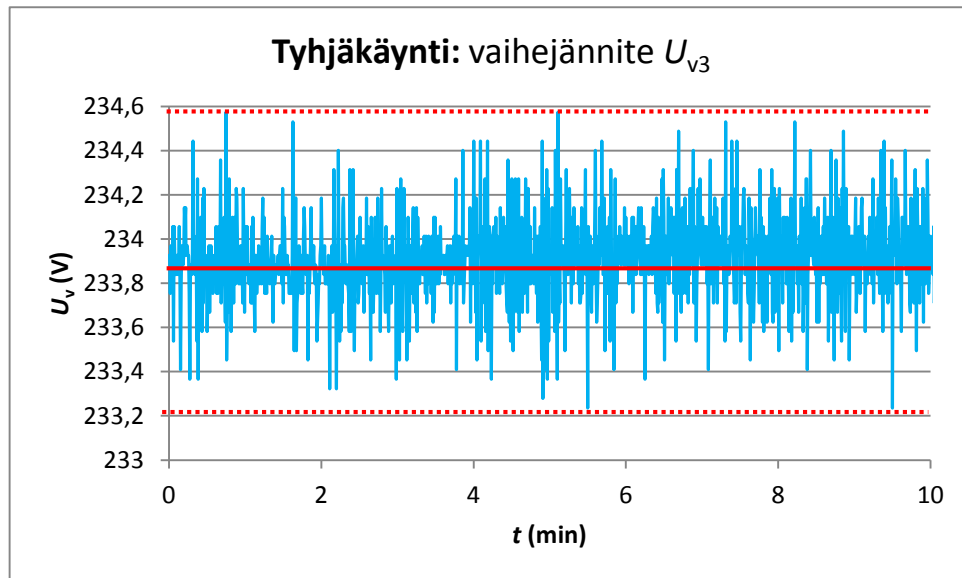
Liite 1. Tyhjäkäyntiajojen mittaustulokset



KUVIO 1.1 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1}



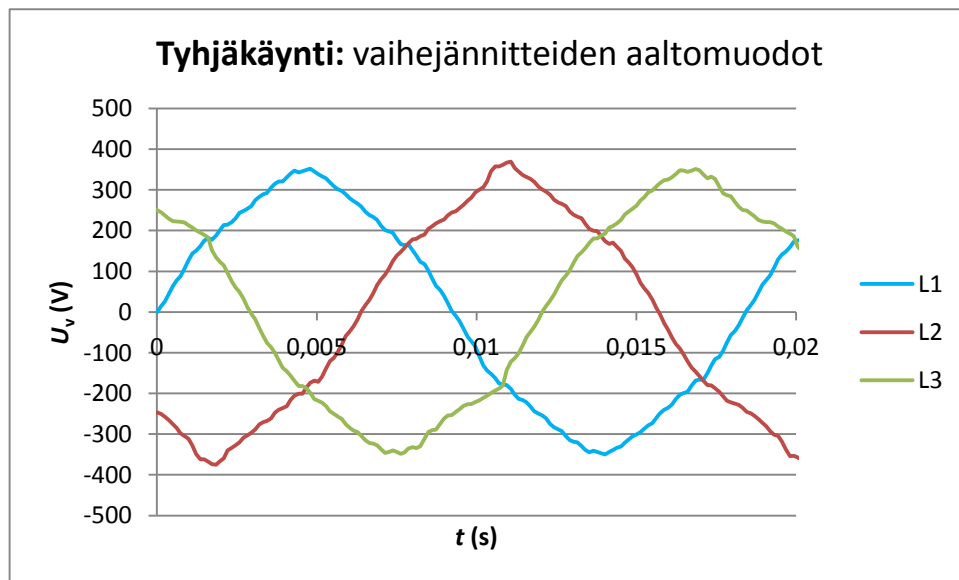
KUVIO 1.2 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2}



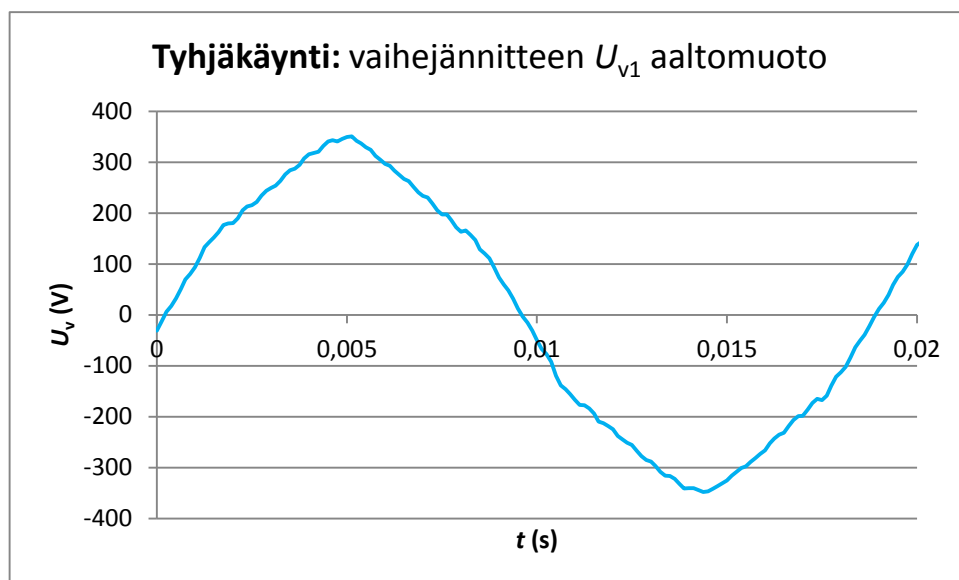
KUVIO 1.3 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3}



KUVIO 1.4 Maadoittamattoman varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus



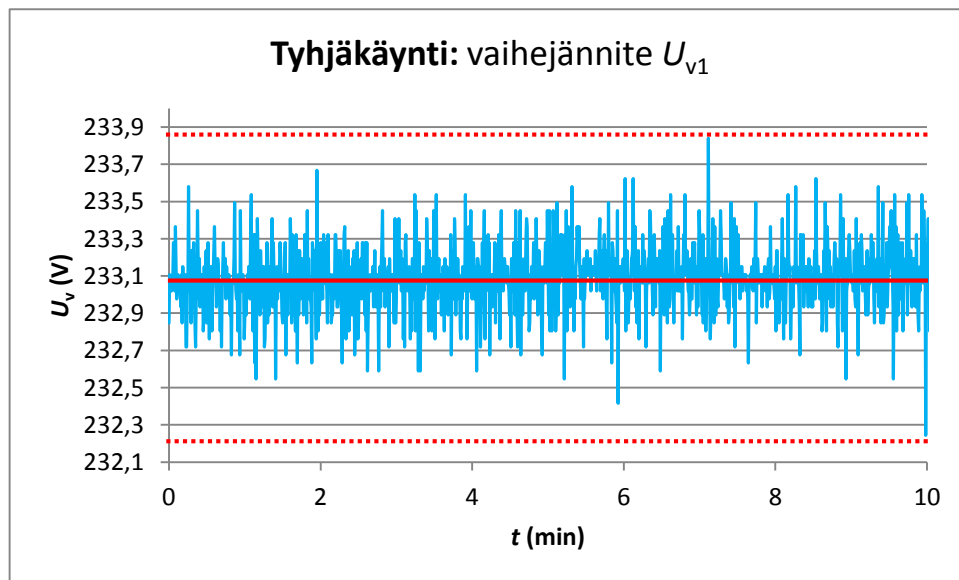
KUVIO 1.5 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot



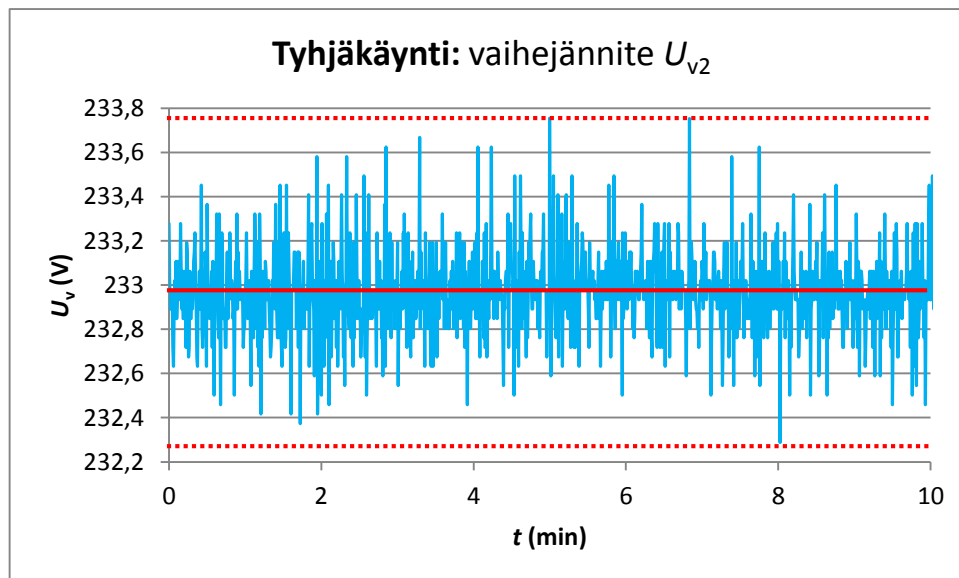
KUVIO 1.6 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen yksivaihepistorasian jännitteen aaltomuoto

TAULUKKO 1.1 Tyhjäkäyvän, maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot

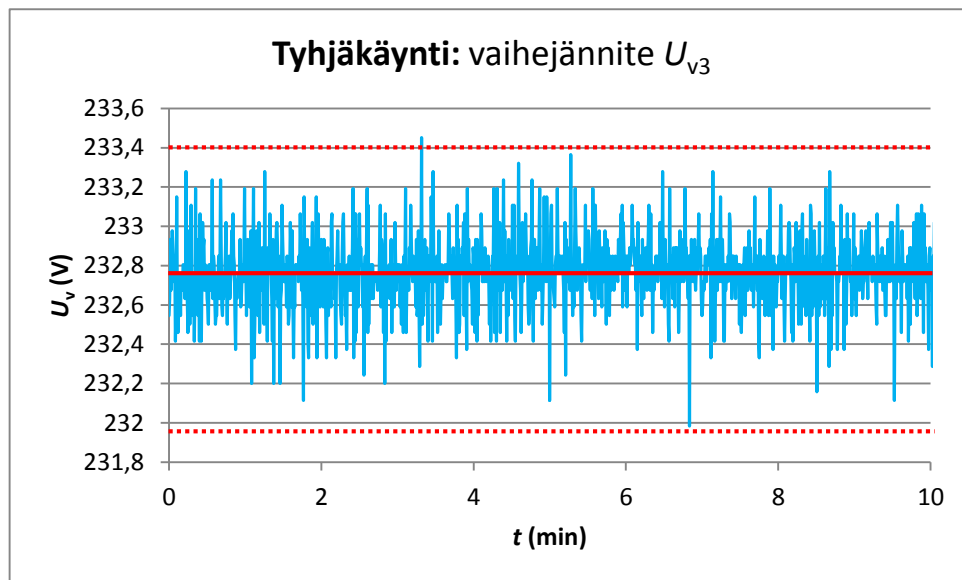
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,9	4,8	0,3	0,3	1,0	5,5
U_{v2}	1,1	6,6	1,6	1,3	1,2	7,5
U_{v3}	1,6	5,5	1,4	1,1	0,5	6,5



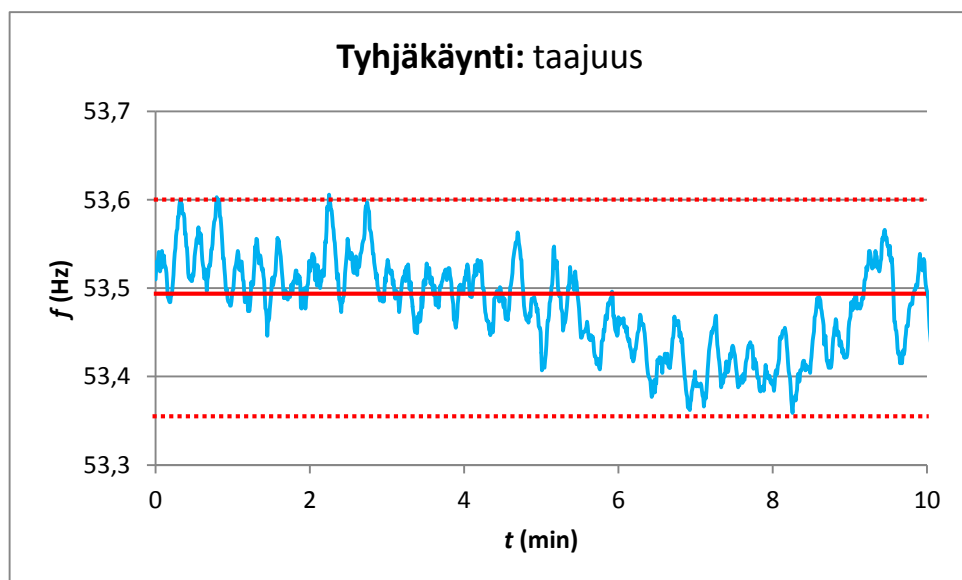
KUVIO 1.7 Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v1}



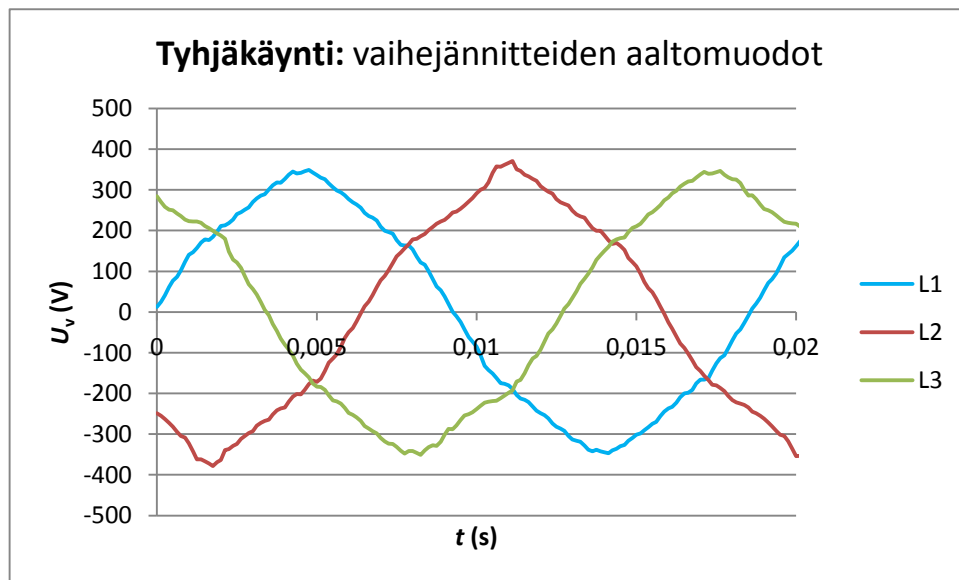
KUVIO 1.8 Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v2}



KUVIO 1.9 Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v3}



KUVIO 1.10 Maadoitetun varavoimakoneen tyhjäkäyntitaajuus

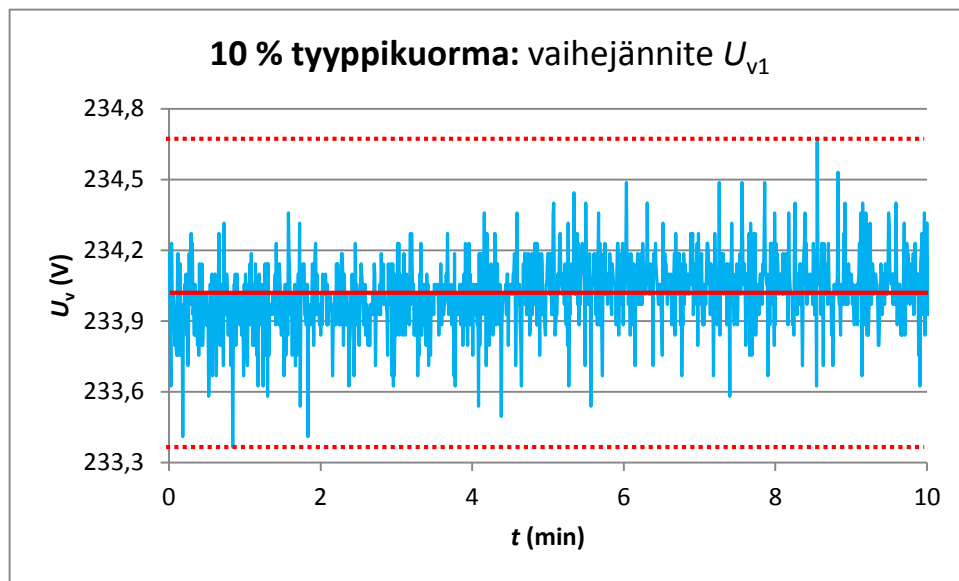


KUVIO 1.11 Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot

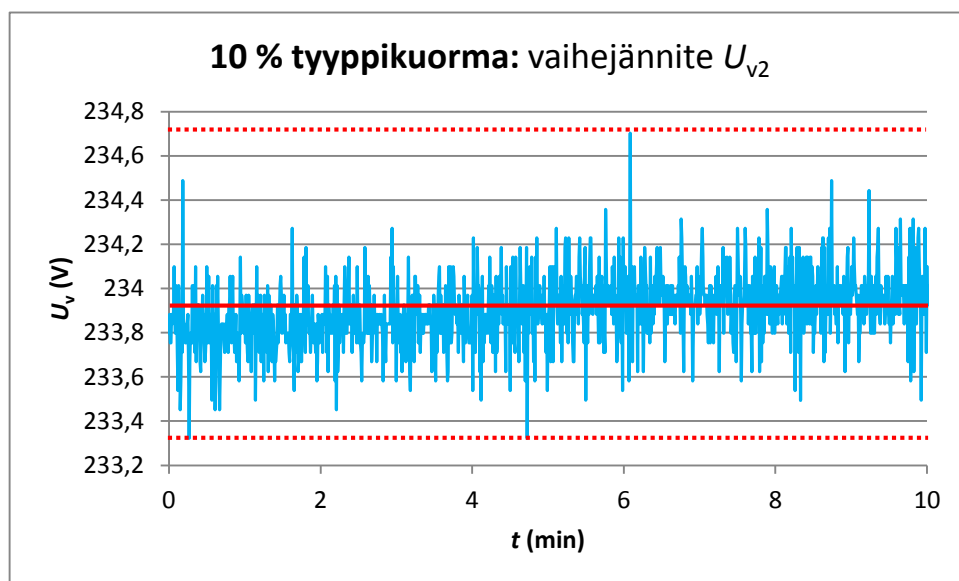
TAULUKKO 1.2 Tyhjäkäyvän, maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallo

Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,6	4,7	0,4	0,2	0,9	5,4
U_{v2}	1,0	6,5	1,6	1,2	1,1	7,4
U_{v3}	1,3	5,4	1,3	1,1	0,4	6,2

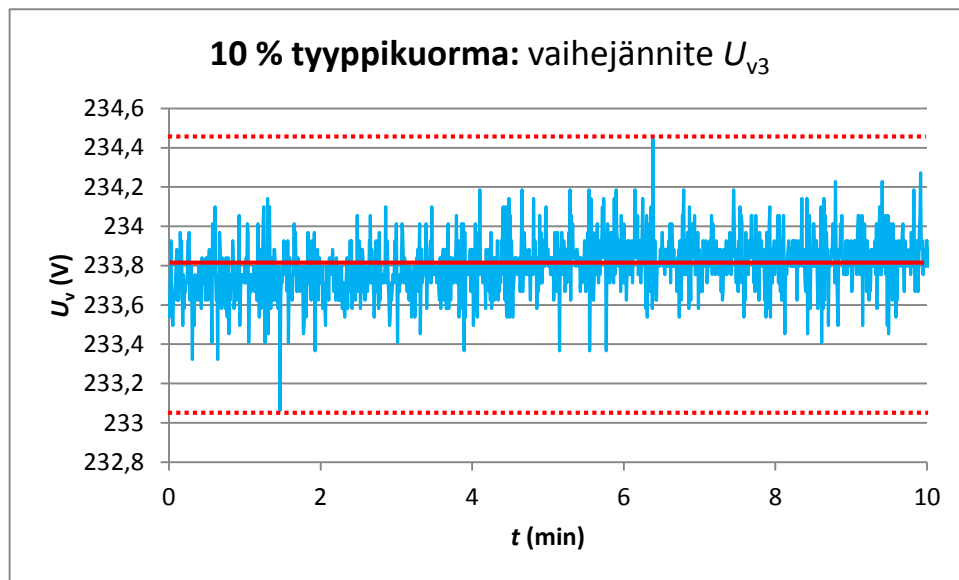
Liite 2. Kuormitusajojen mittaustulokset



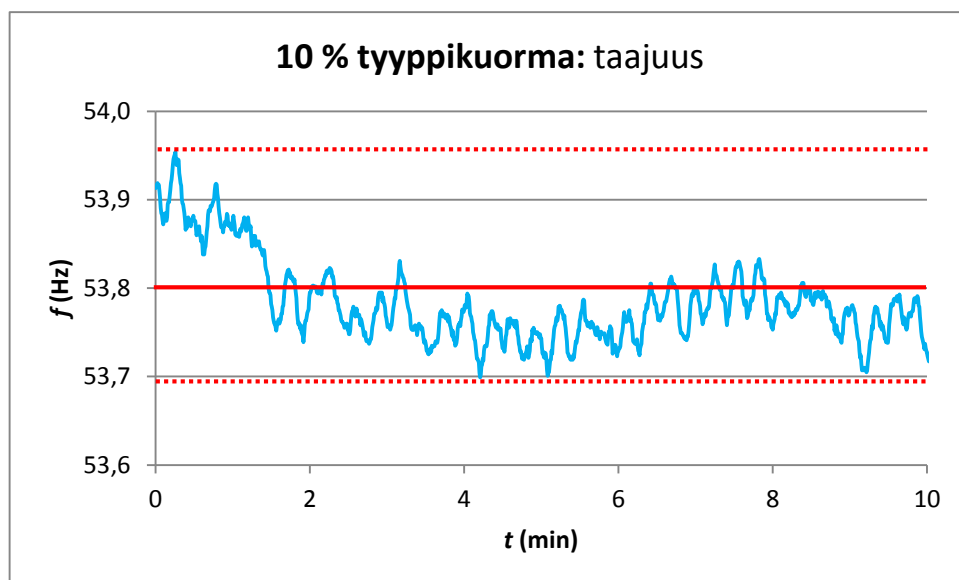
KUVIO 2.1 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.2. Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



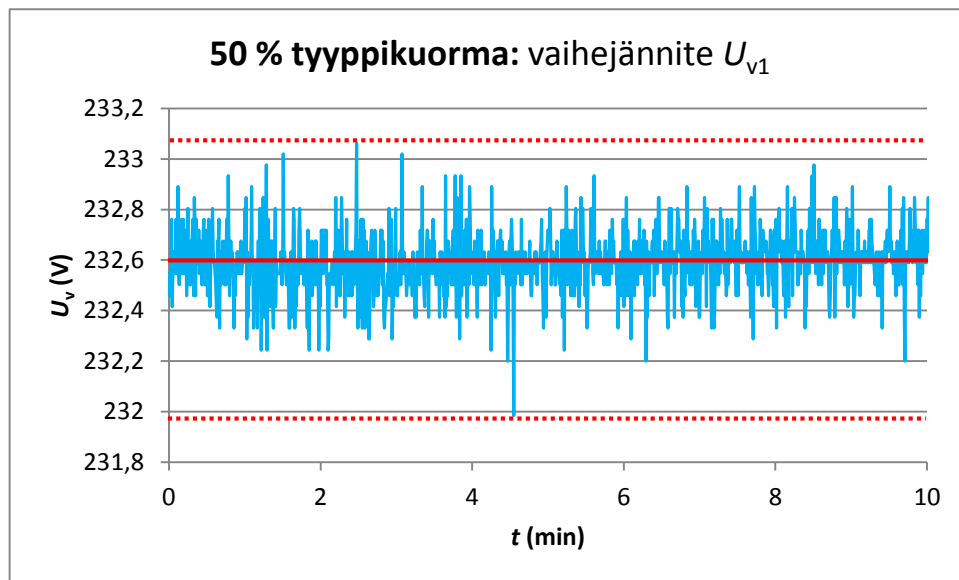
KUVIO 2.3 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



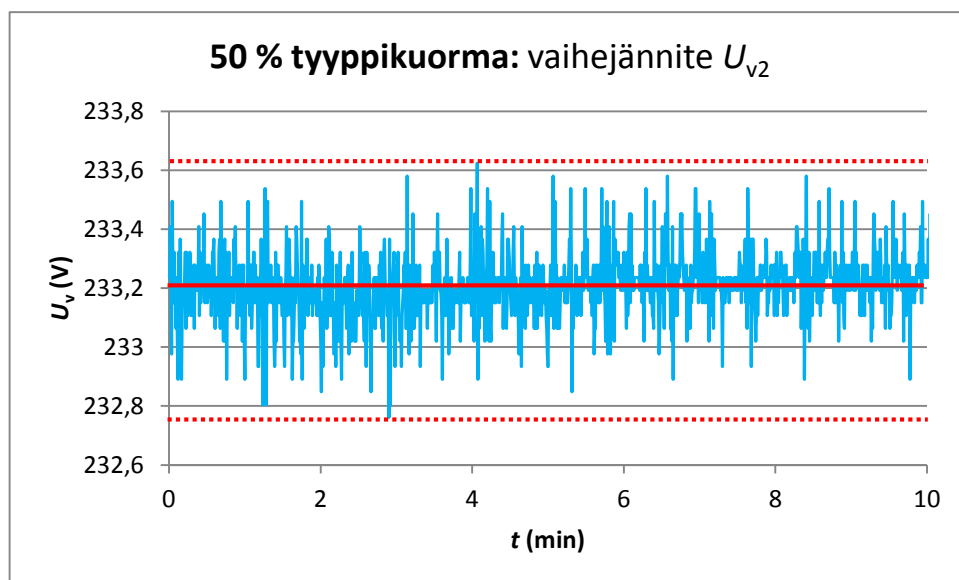
KUVIO 2.4 Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.1 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma

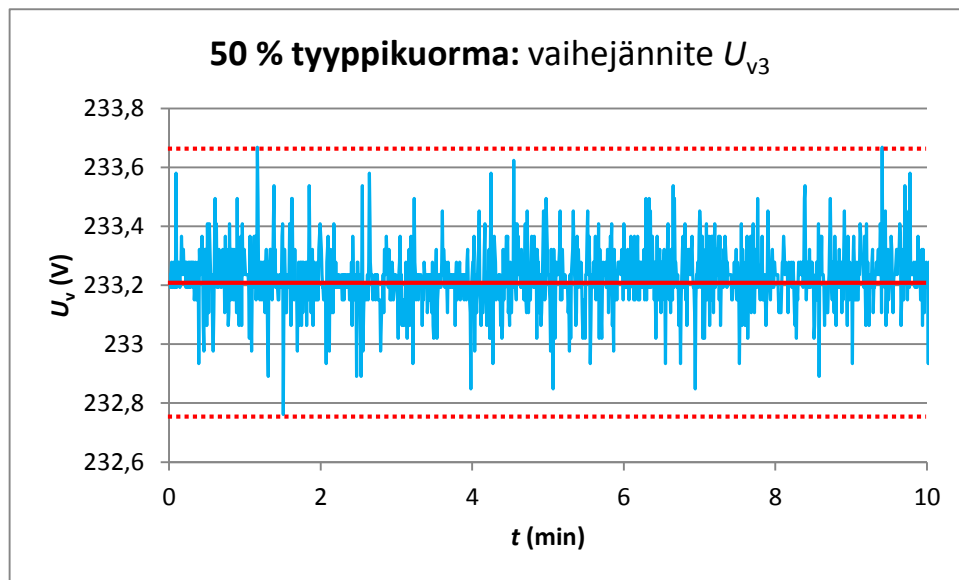
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,5	4,5	0,4	0,2	0,9	5,1
U_{v2}	1,1	6,0	1,1	1,2	1,2	6,7
U_{v3}	1,4	5,5	1,2	1,0	0,6	6,2



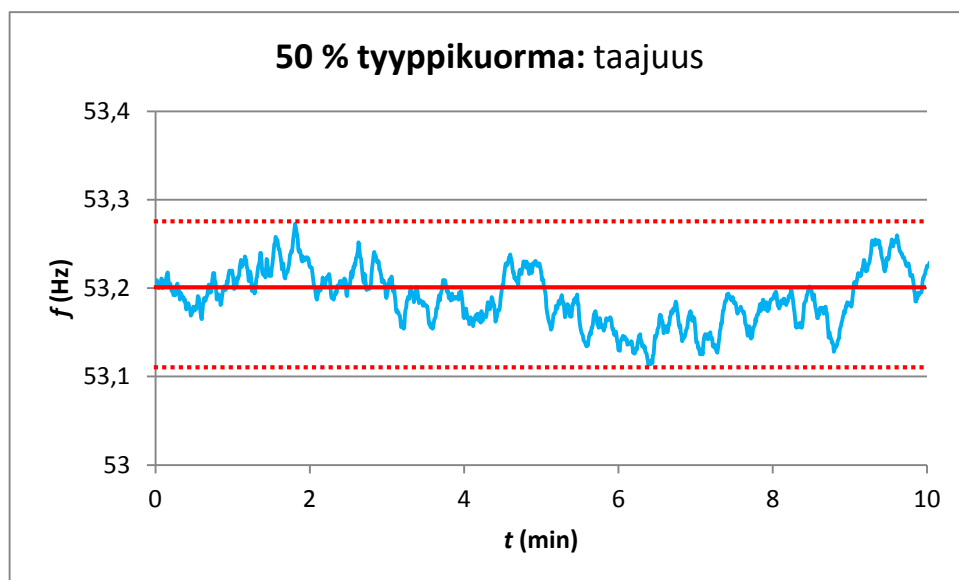
KUVIO 2.5 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.6 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



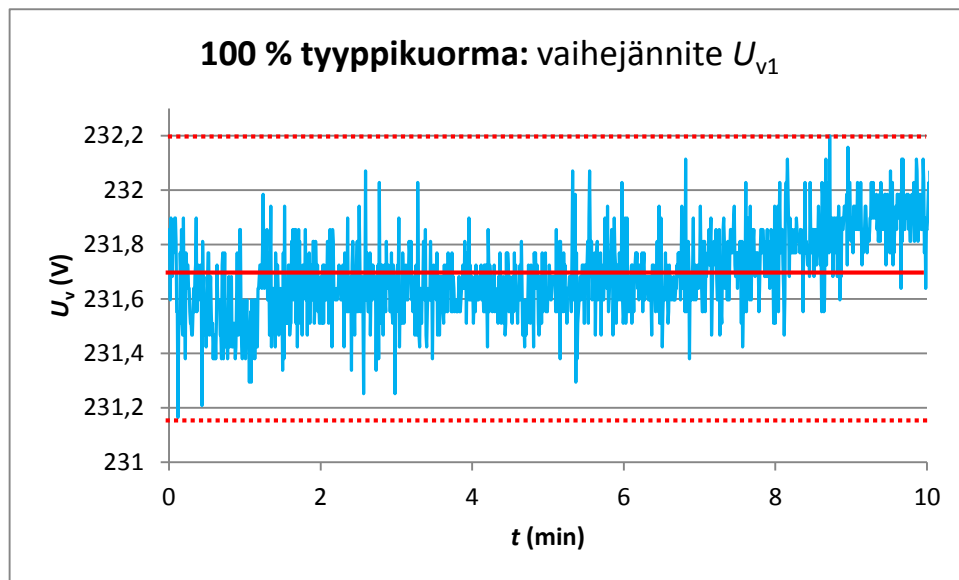
KUVIO 2.7 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



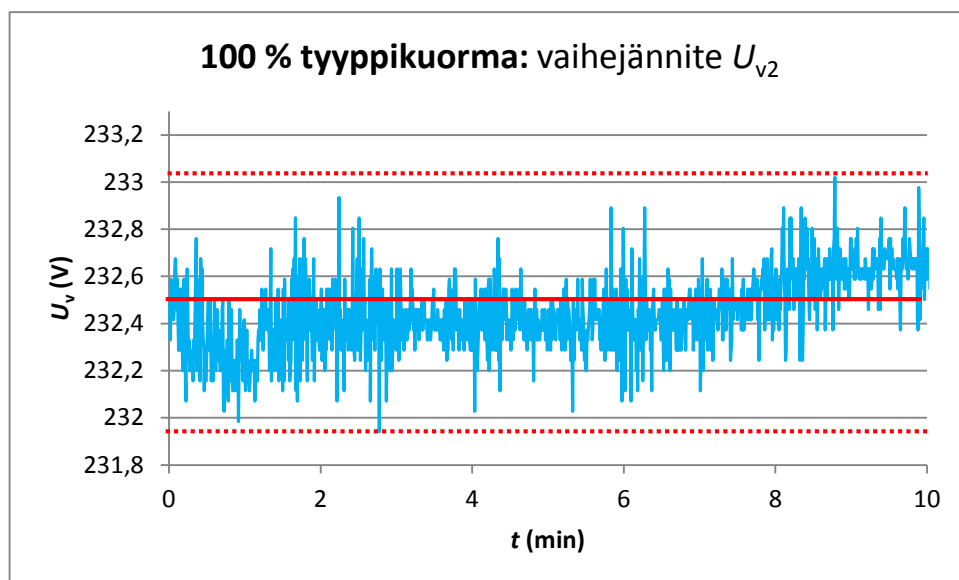
KUVIO 2.8 Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.2 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

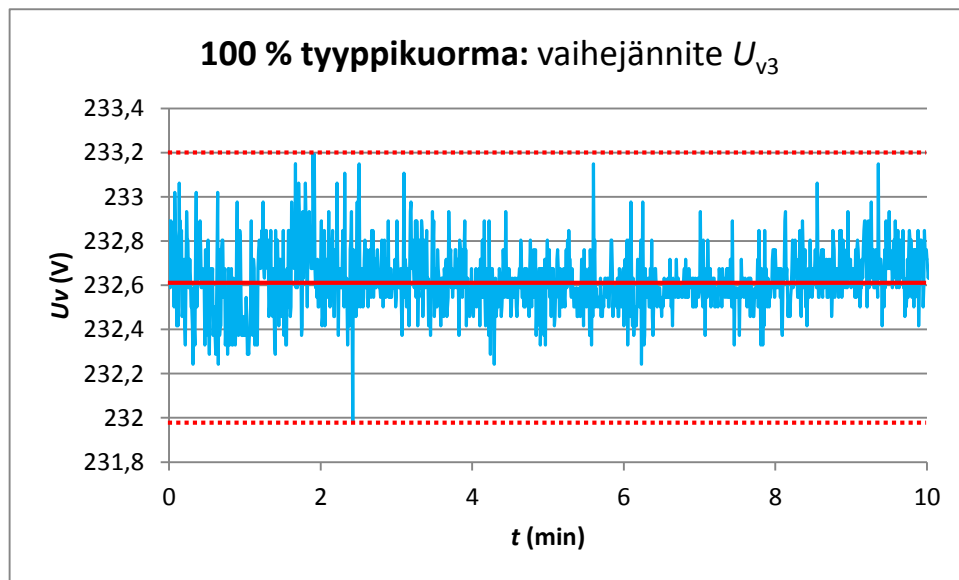
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,6	3,7	0,9	0,3	0,8	4,4
U_{v2}	1,0	4,8	0,8	1,2	1,4	5,7
U_{v3}	1,4	5,0	1,8	1,1	0,9	5,9



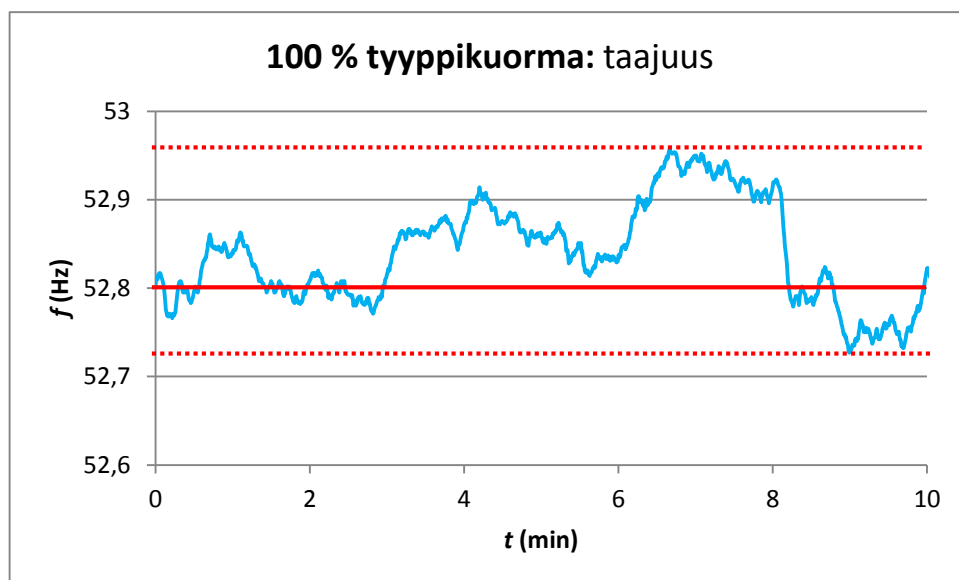
KUVIO 2.9 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.10 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



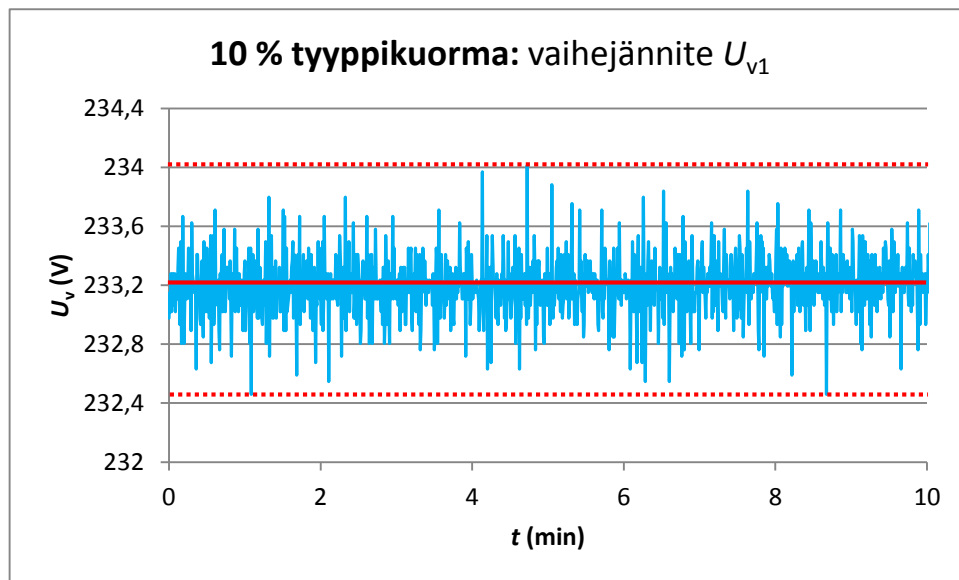
KUVIO 2.11 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



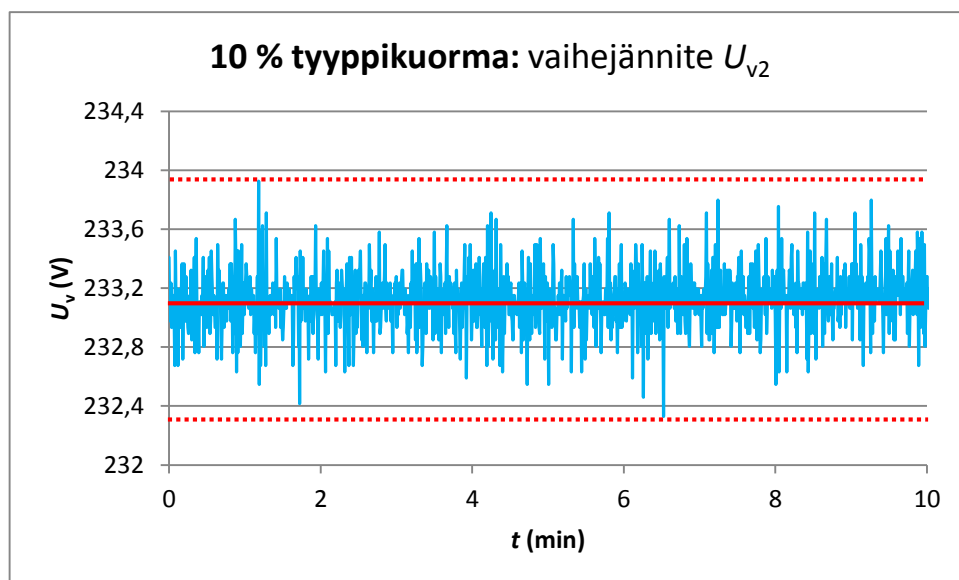
KUVIO 2.12 Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.3 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma

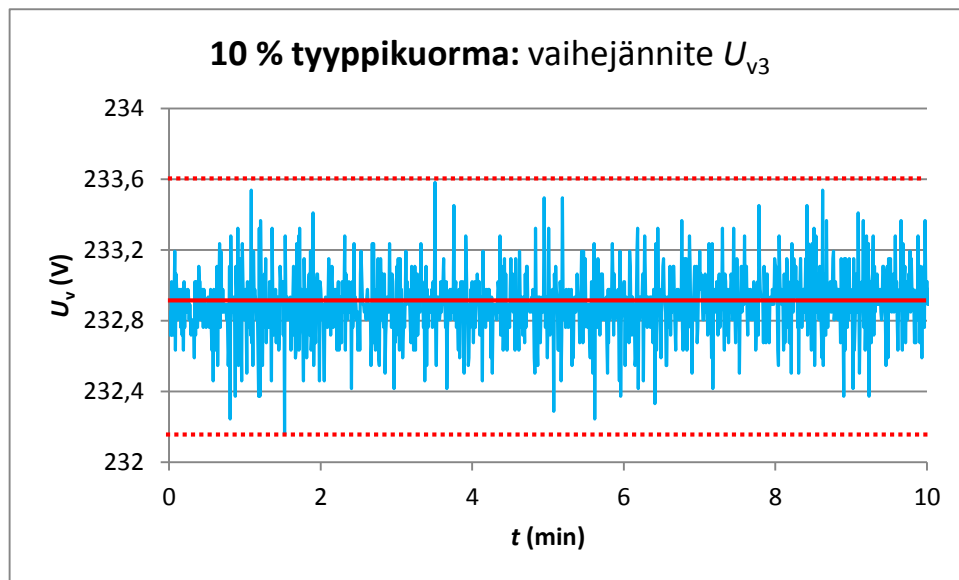
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	1,6	3,8	1,1	0,6	0,6	4,9
U_{v2}	1,2	3,8	1,0	1,4	1,4	5
U_{v3}	2,3	4,2	1,8	1,0	1,0	5,7



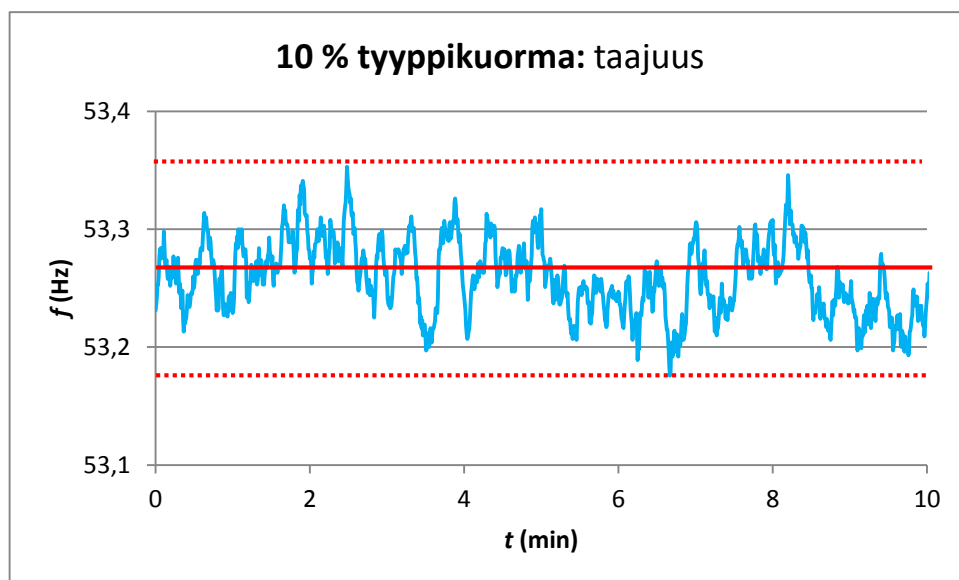
KUVIO 2.13 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.14 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



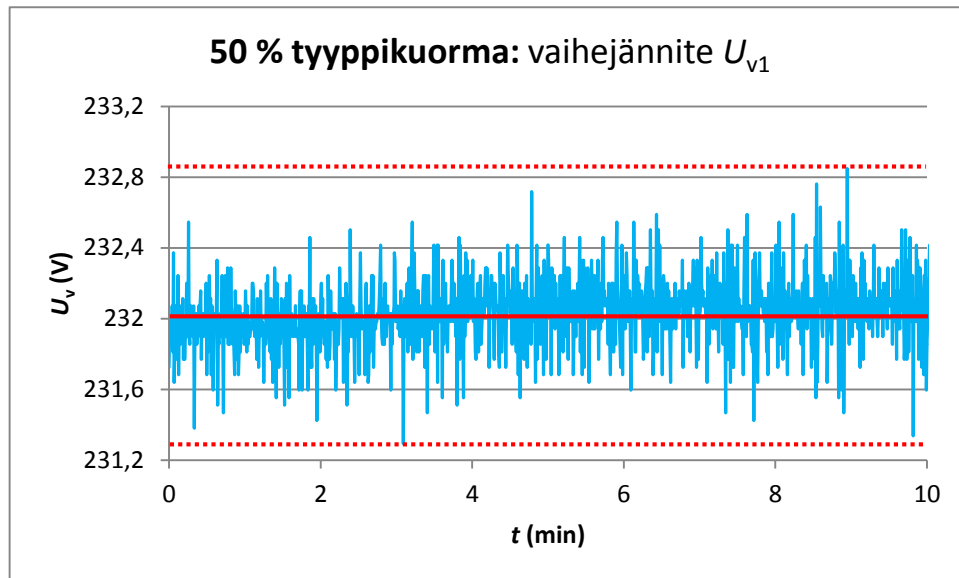
KUVIO 2.15 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma



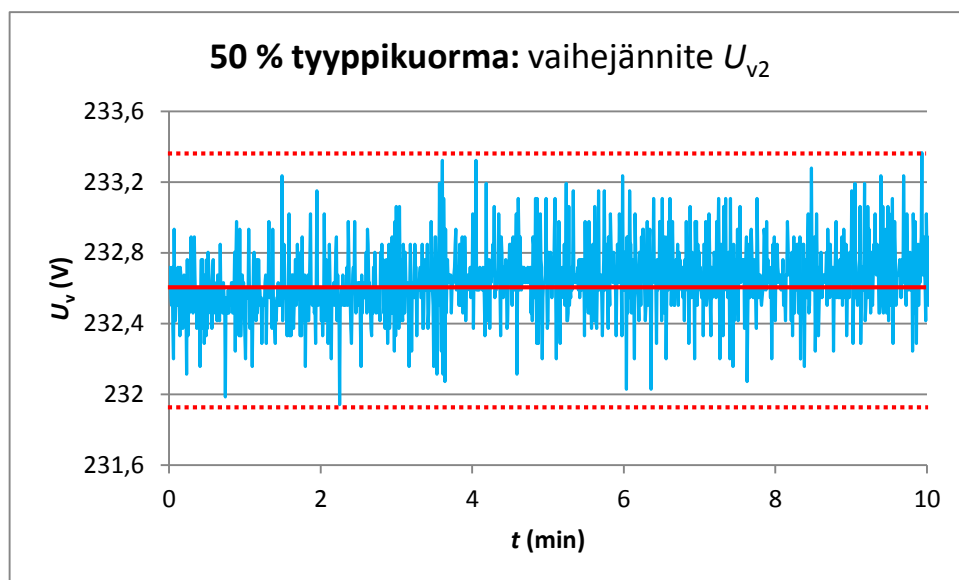
KUVIO 2.16 Maadoitetun varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.4 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 10 %:n tyypikuorma

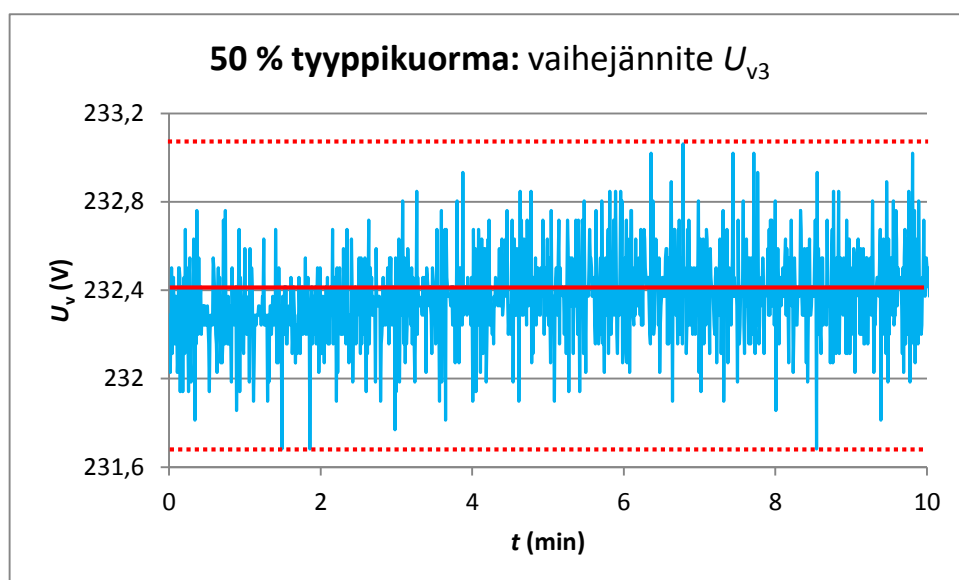
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,6	4,5	0,4	0,2	0,9	5,2
U_{v2}	1,1	6,0	1,1	1,2	1,2	6,8
U_{v3}	1,3	5,4	1,3	1,0	0,6	6,2



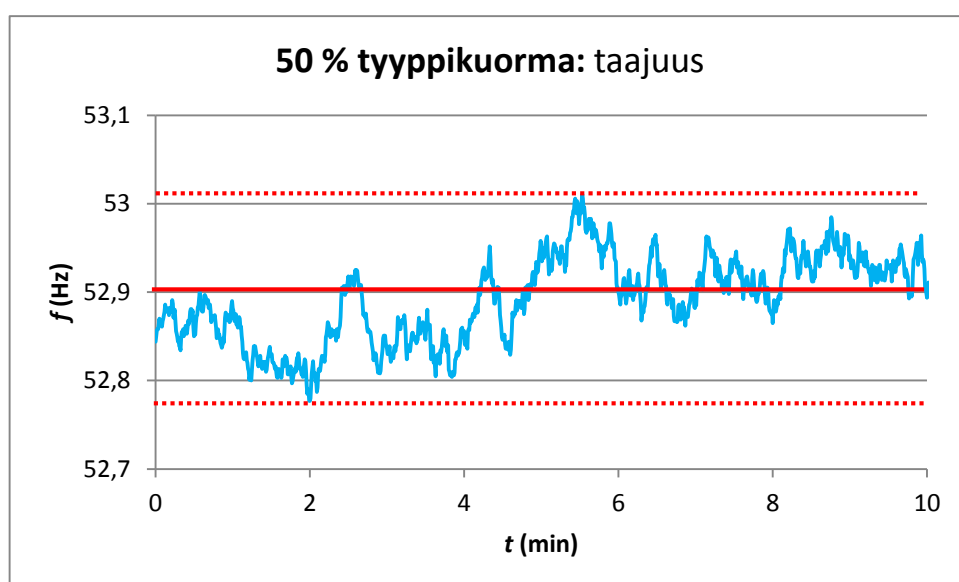
KUVIO 2.17 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.18 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



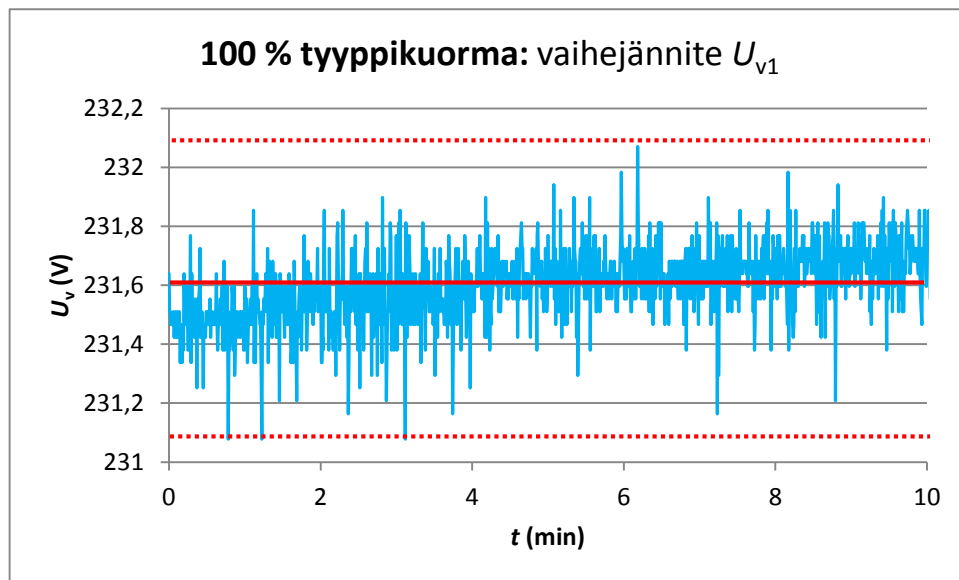
KUVIO 2.19 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma



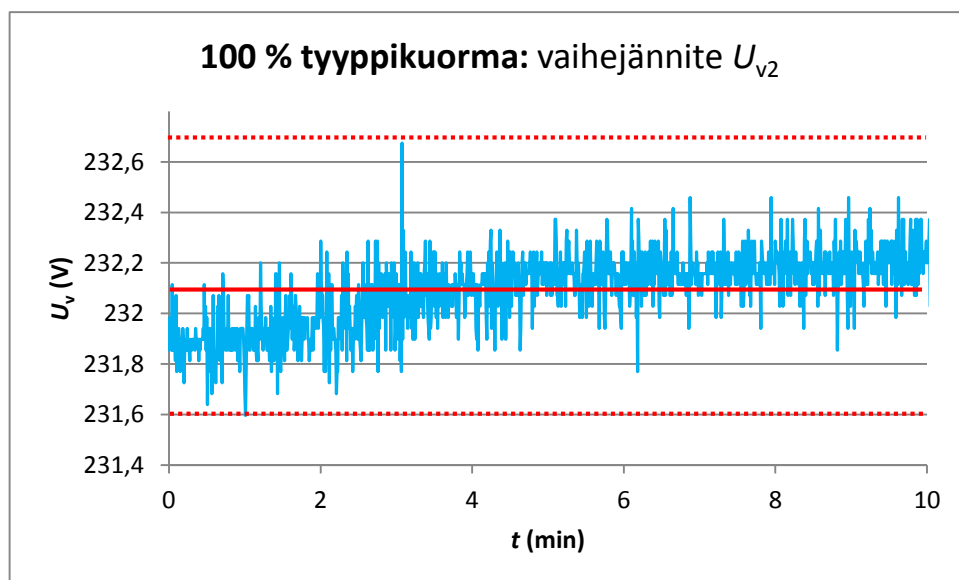
KUVIO 2.20 Maadoitetun varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.5 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 50 %:n tyypikuorma

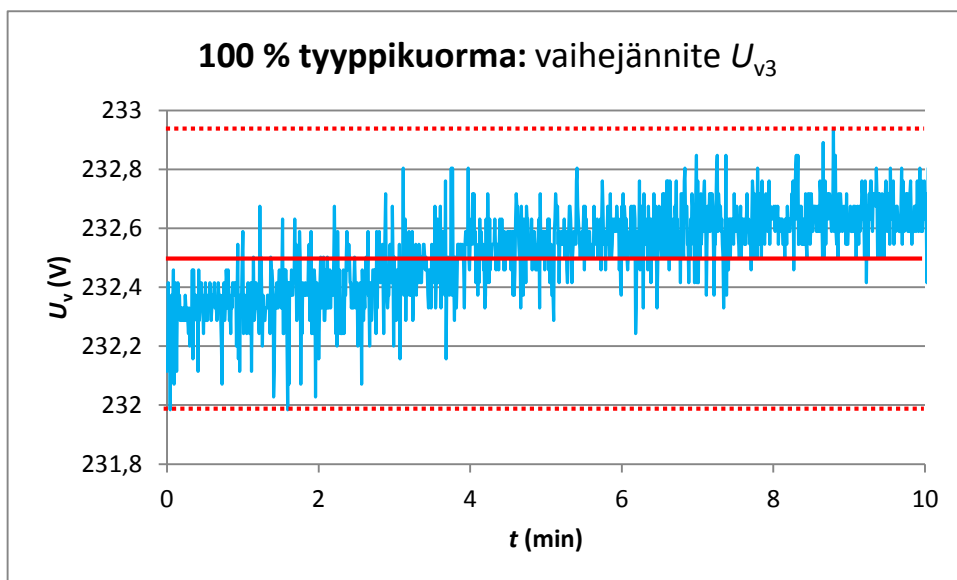
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	0,8	3,7	1,0	0,3	0,9	4,6
U_{v2}	1,1	4,9	0,8	1,3	1,4	5,9
U_{v3}	1,5	5,1	1,8	1,1	0,9	6,1



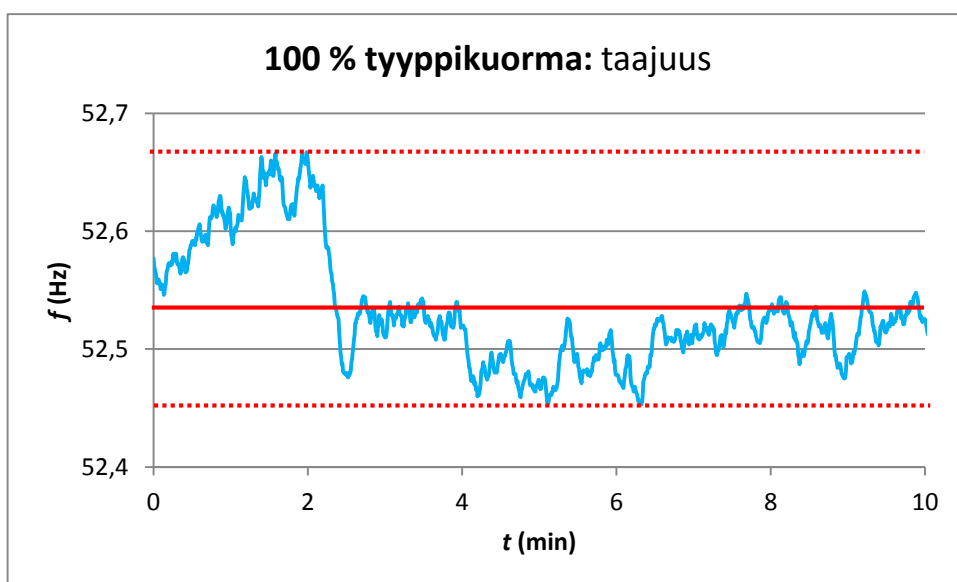
KUVIO 2.21 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



KUVIO 2.22 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



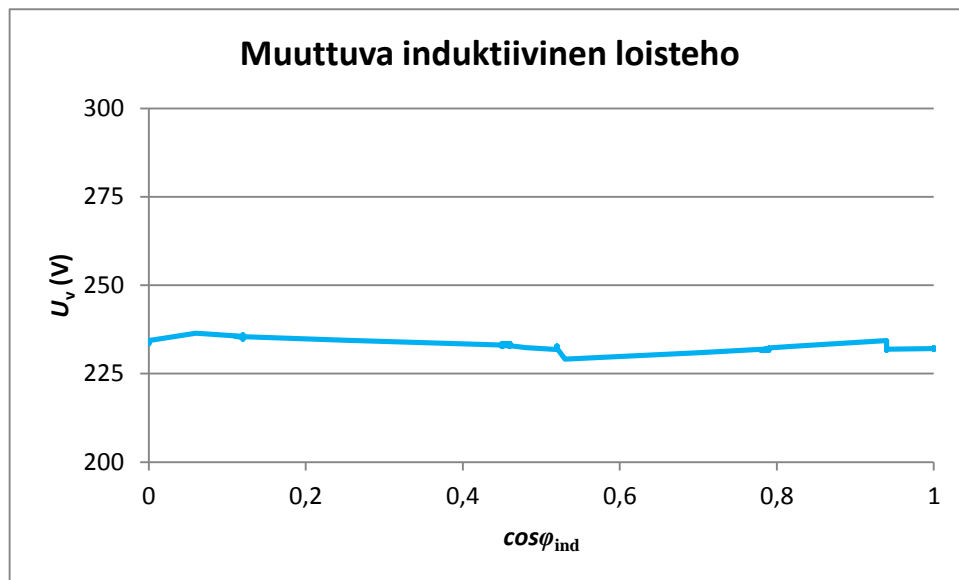
KUVIO 2.23 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma



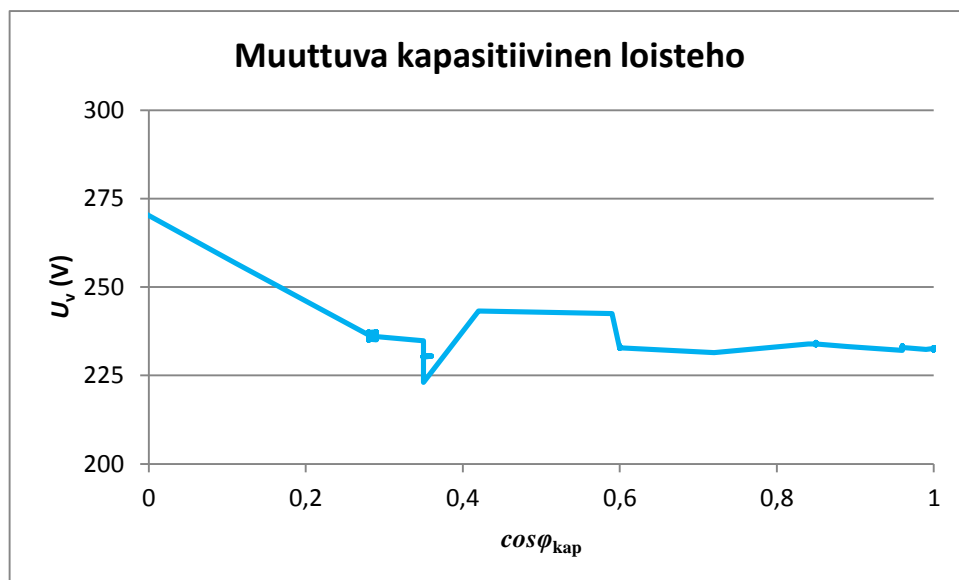
KUVIO 2.24 Maadoitetun varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma

TAULUKKO 2.6 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli 100 %:n tyypikuorma

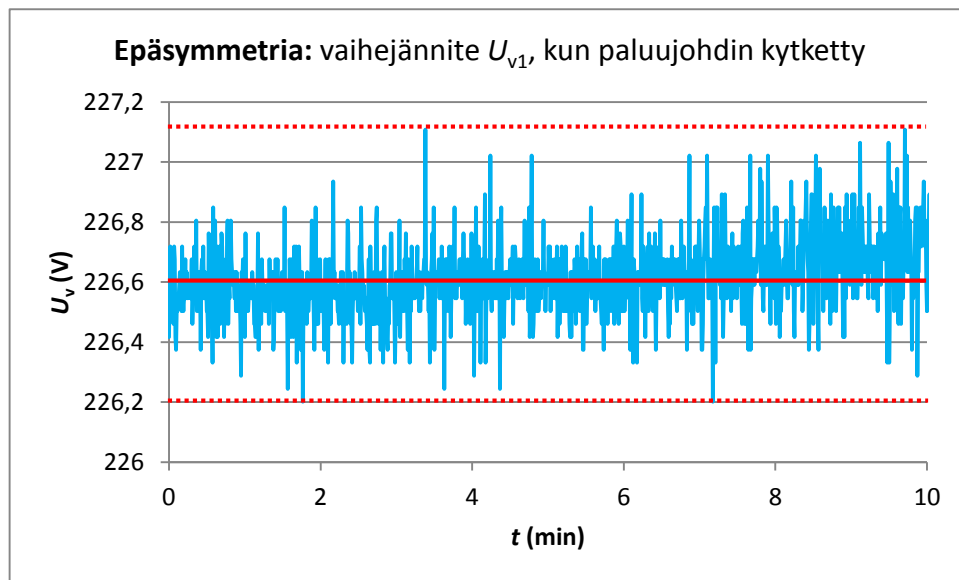
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	1,2	3,7	1,1	0,6	0,9	4,7
U_{v2}	1,0	4,2	1,0	1,3	1,3	5,3
U_{v3}	2,0	4,4	1,8	1,1	0,8	5,8



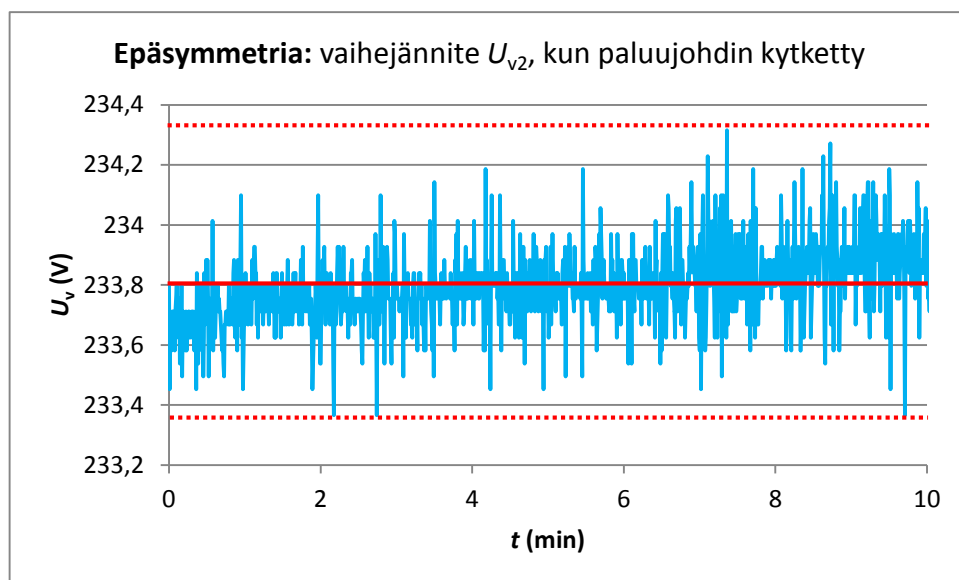
KUVIO 2.25 Induktiivisen loistehon vaikutus vaihejännitteeseen



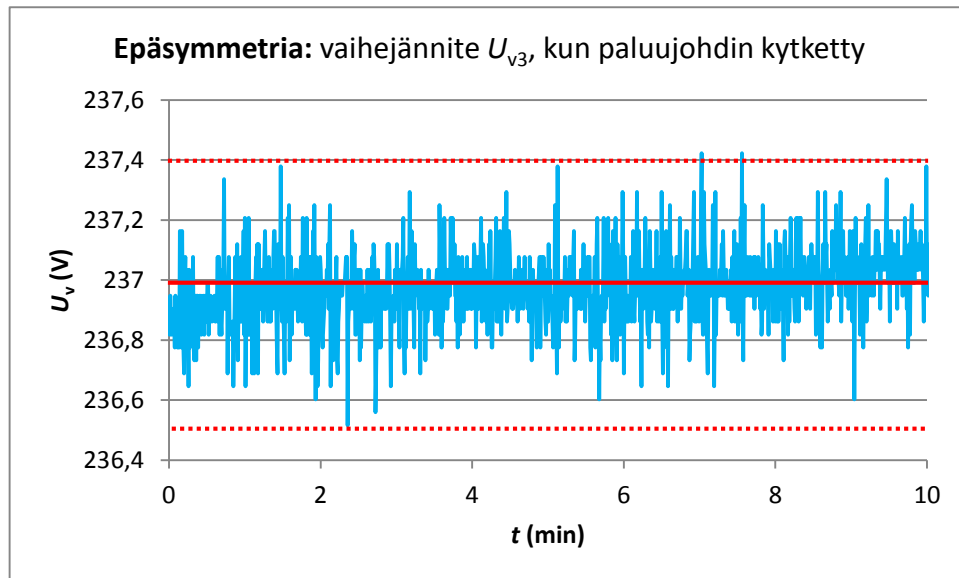
KUVIO 2.26 Kapasitiivisen loistehon vaikutus vaihejännitteeseen



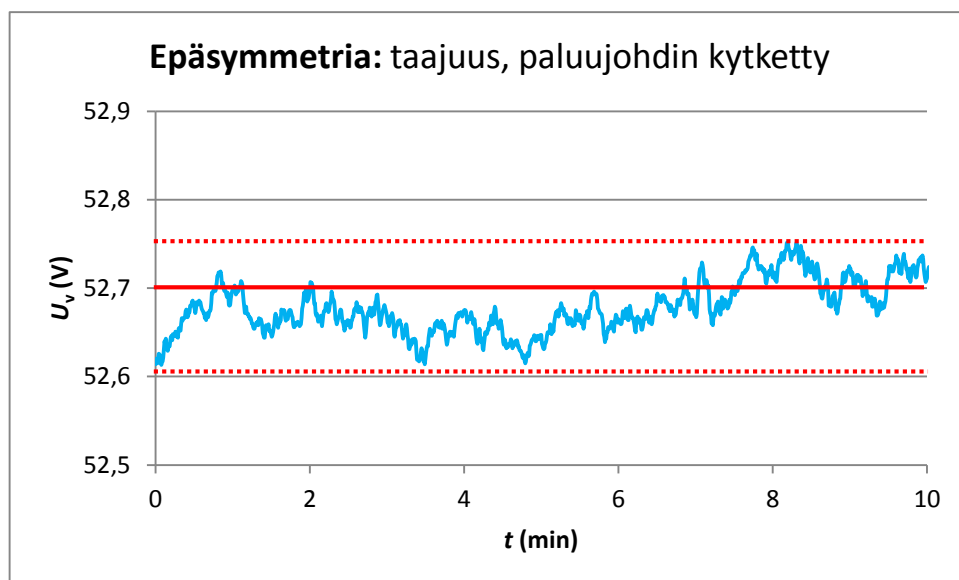
KUVIO 2.27 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty



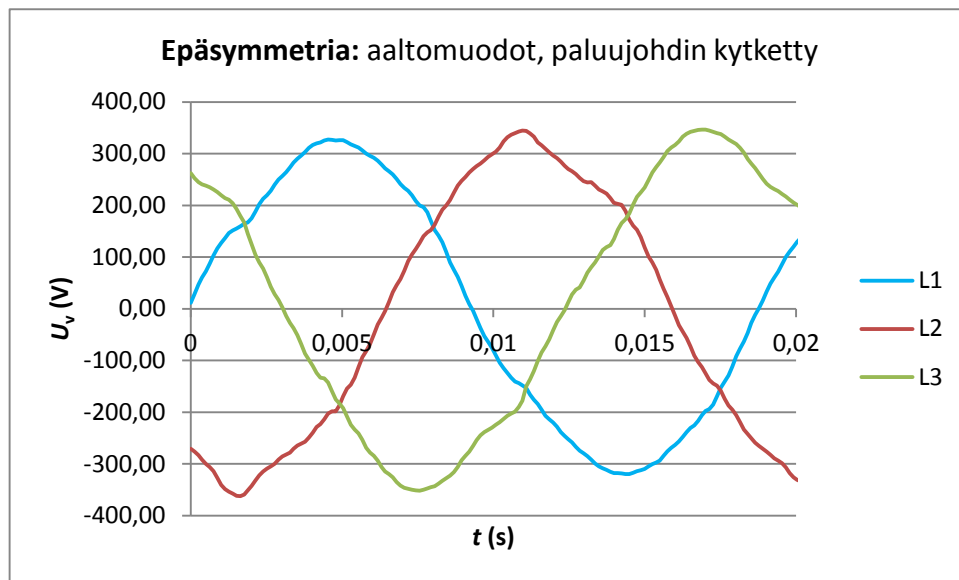
KUVIO 2.28 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty



KUVIO 2.29 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty



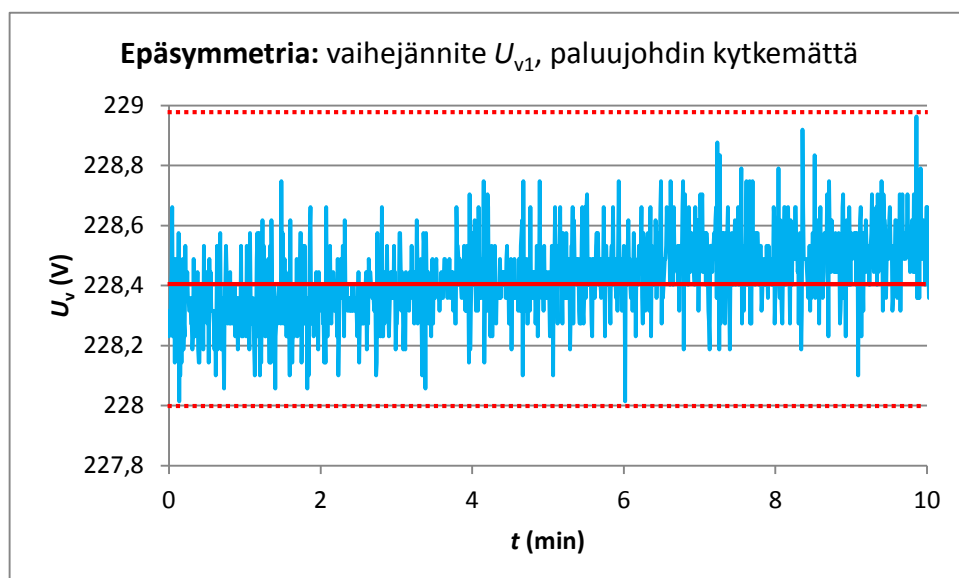
KUVIO 2.30 Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty



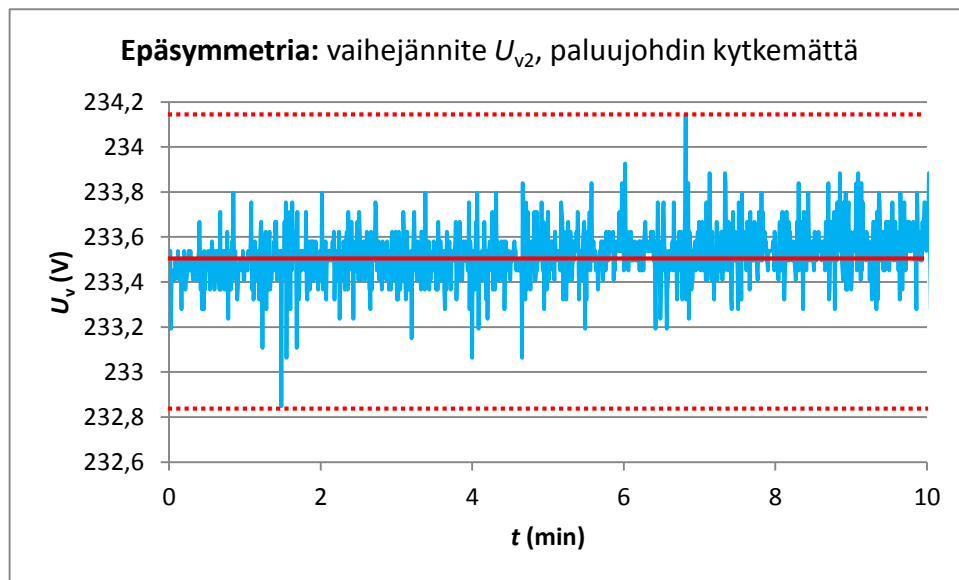
KUVIO 2.31 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty

TAULUKKO 2.7 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdin oli kytketty

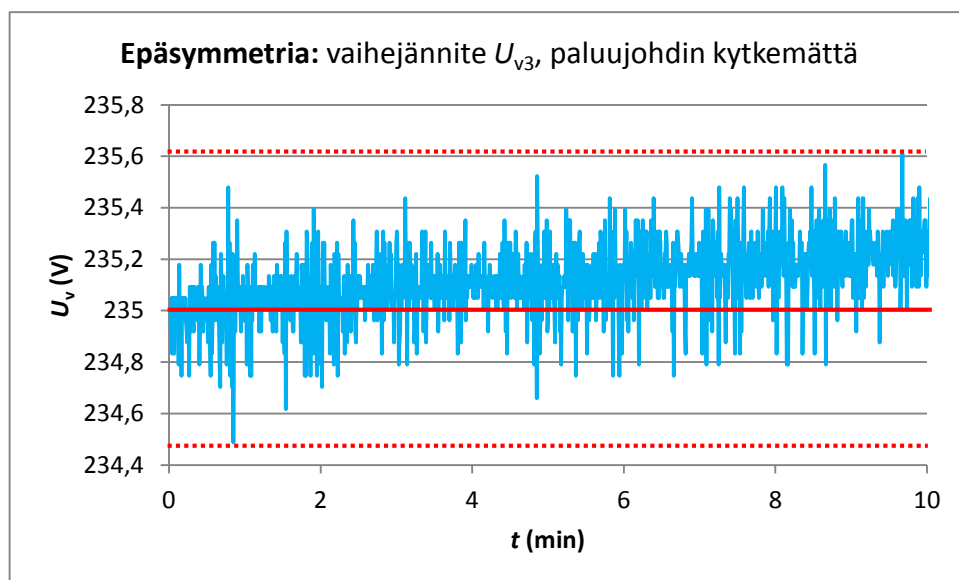
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	4,4	3,7	0,9	0,4	0,8	6,2
U_{v2}	2,6	4,8	1,3	1,5	1	6,4
U_{v3}	3,1	4,4	2,0	1,2	0,7	6,4



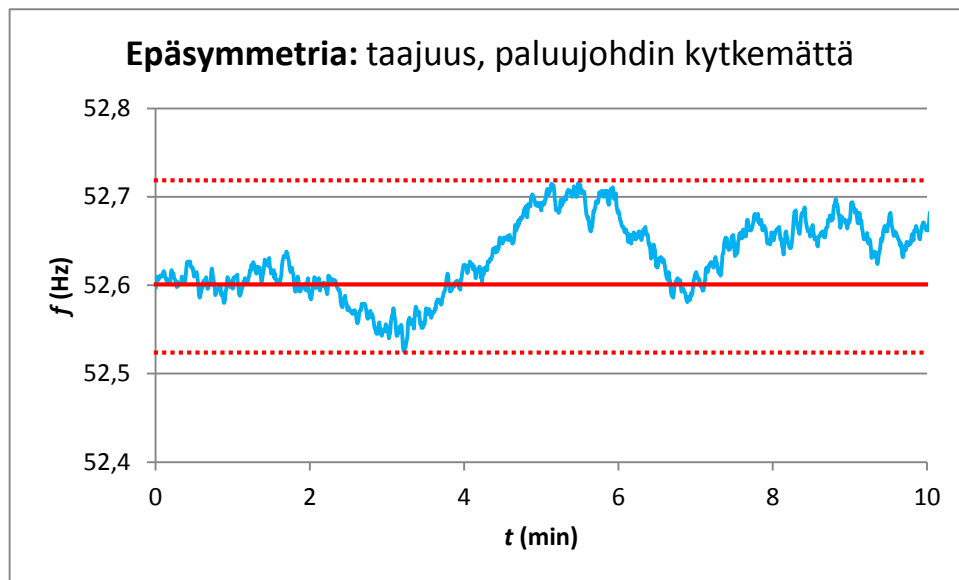
KUVIO 2.32 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty



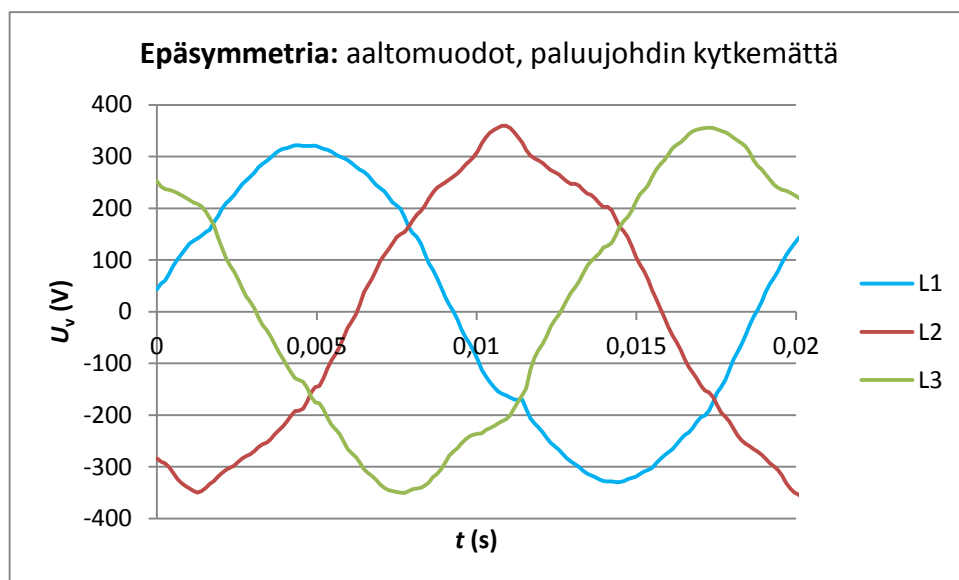
KUVIO 2.33 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty



KUVIO 2.34 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty



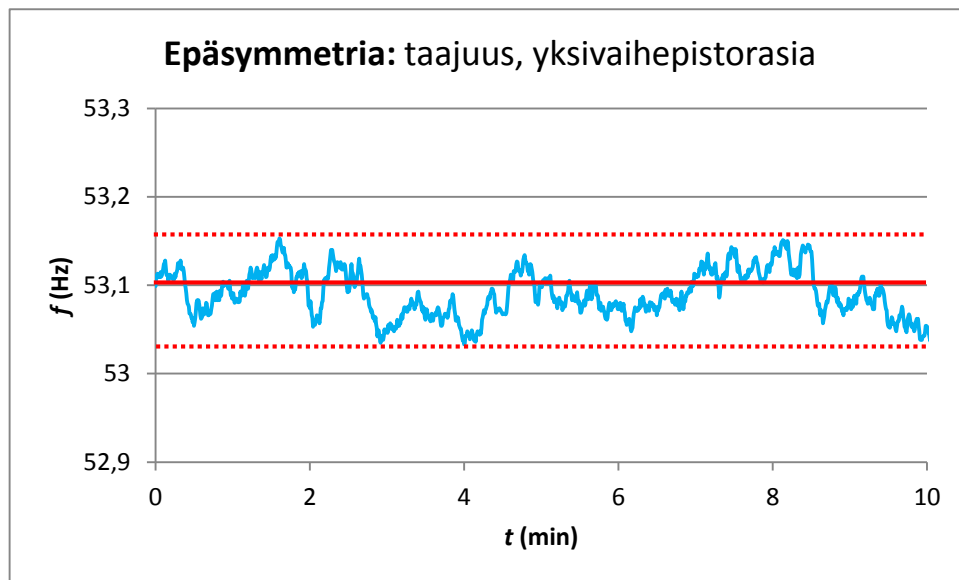
KUVIO 2.35 Maadoittamattoman varavoimakoneen taajuus, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty



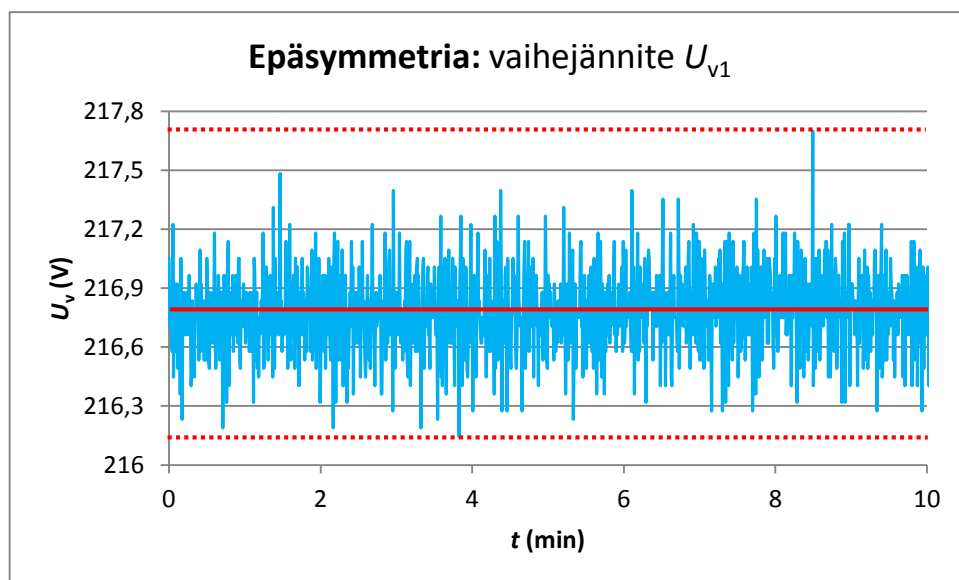
KUVIO 2.36 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty

TAULUKKO 2.8 Maadoittamattoman varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormitus oli epäsymmetrinen ja paluujohdinta ei oltu kytketty

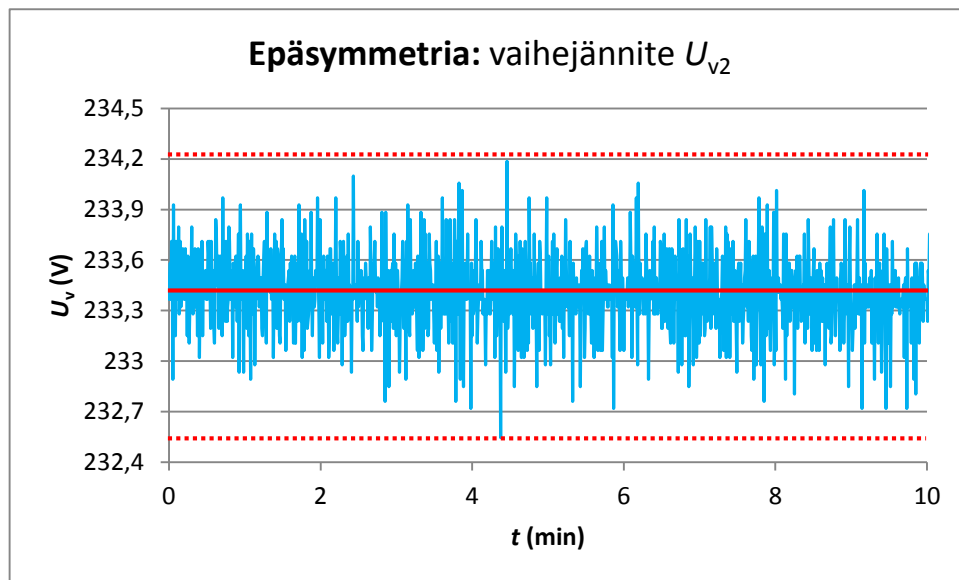
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	3,5	3,4	0,9	0,4	0,8	5,4
U_{v2}	1,8	4,7	1,2	1,5	1,1	6,0
U_{v3}	2,6	4,9	1,9	1,3	0,8	6,4



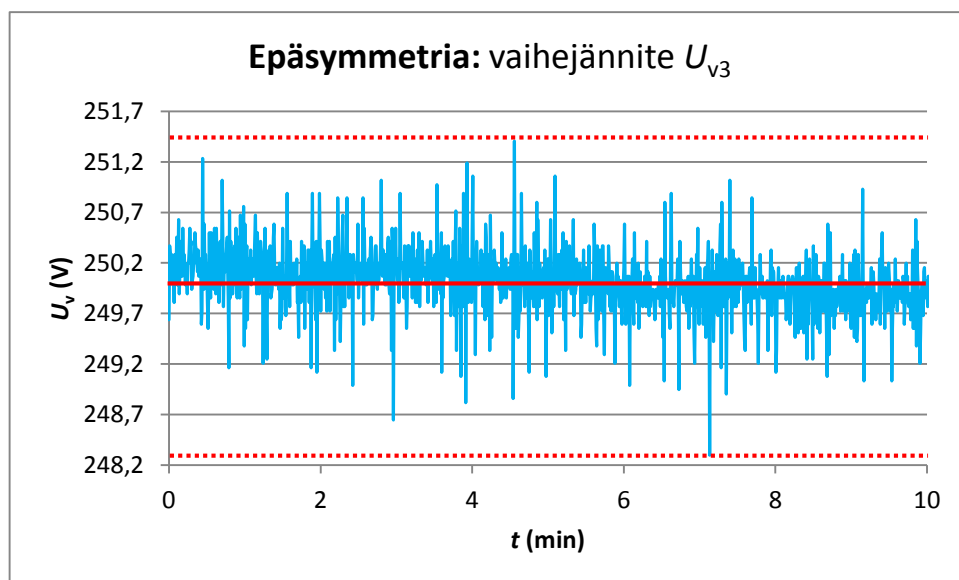
KUVIO 2.37 Maadoittamattoman varavoimakoneen kuormittamattoman L1-vaiheen yksivaihepistorasian jännitteen taajuus



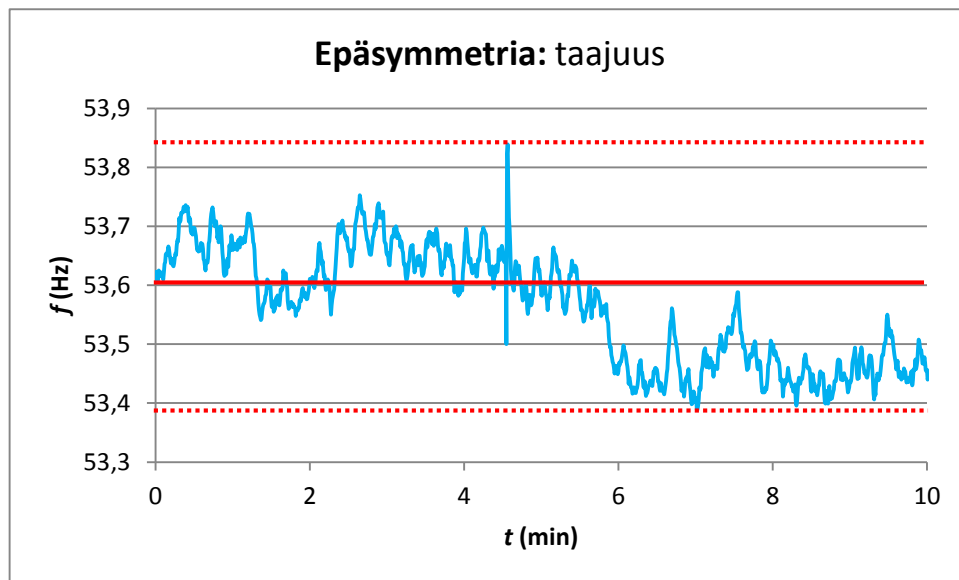
KUVIO 2.38 Maadoitetun varavoimakoneen kuormitetun vaiheen vaihejännite U_{v1} , kun siihen oli kytketty 100 %:n tyyppikuorma



KUVIO 2.39 Maadoitetun varavoimakoneen kuormittamattoman vaiheen vaihejännite U_{v2} , kun L1-vaiheeseen oli kytketty 100 %:n tyypikuorma



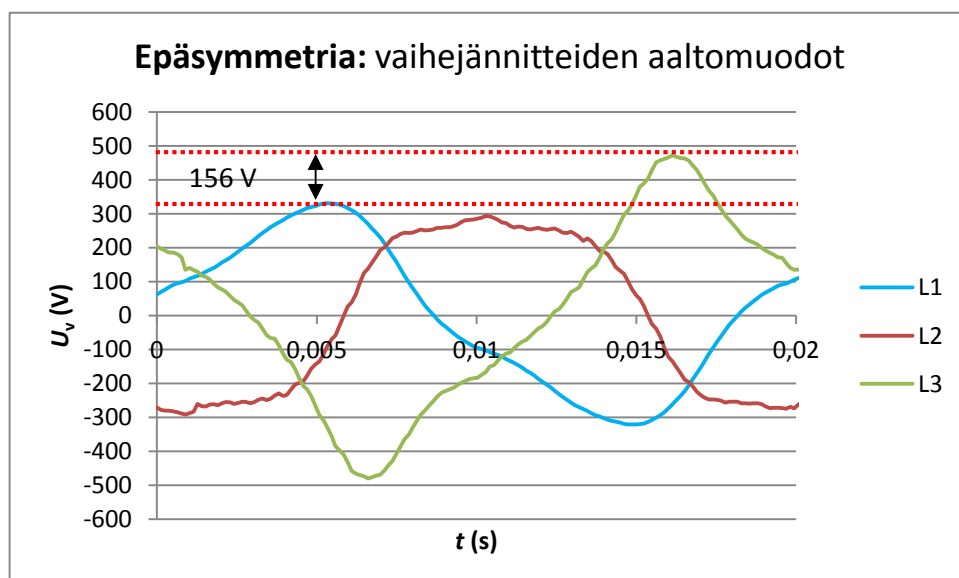
KUVIO 2.40 Maadoitetun varavoimakoneen kuormittamattoman vaiheen vaihejännite U_{v3} , kun L1-vaiheeseen oli kytketty 100 %:n tyypikuorma



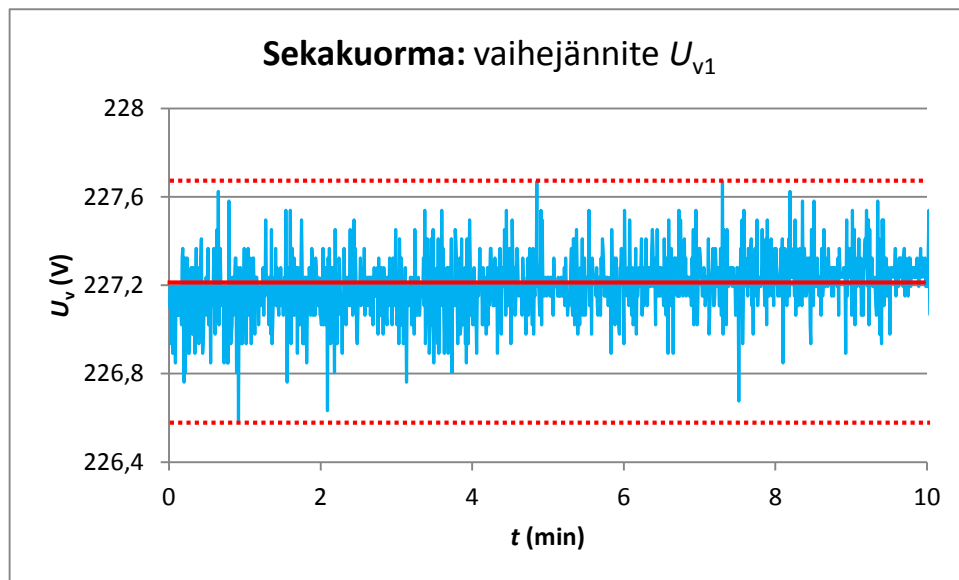
KUVIO 2.41 Maadoitetun varavoimakoneen taajuus, kun L1-vaiheeseen oli kytketty 100 %:n tyyppikuorma

TAULUKKO 2.9 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun vaiheeseen L1 oli kytketty 100 %:n tyyppikuorma ja muita vaiheita ei kuormitettu

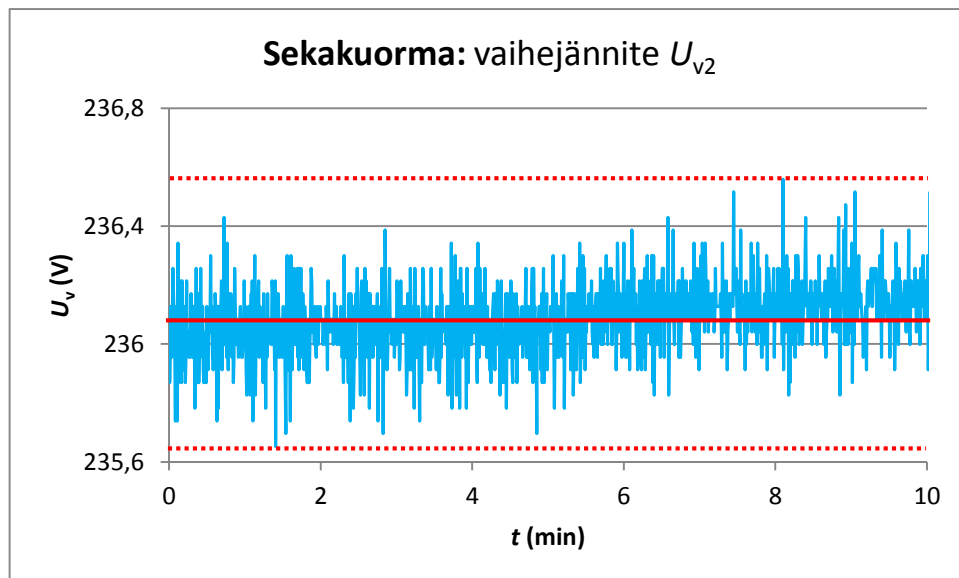
Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	13,1	3,5	0,4	0,4	0,5	13,7
U_{v2}	10,8	7,1	1,9	1,3	0,8	13,4
U_{v3}	11,4	5,1	1,8	1,3	0,4	13,0



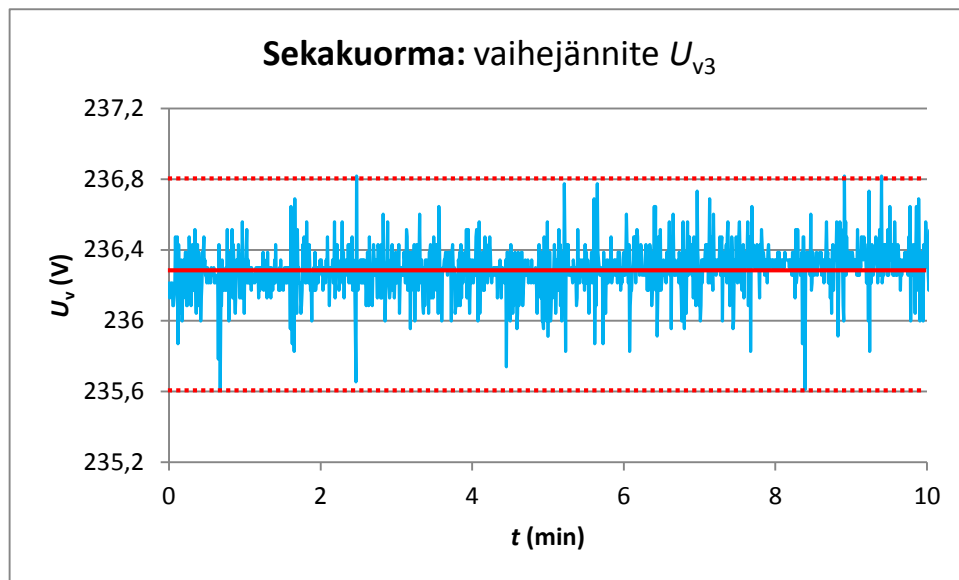
KUVIO 2.42 Maadoitetun varavoimakoneen vaihejännitteiden aaltomuodot, kun L1-vaihetta kuormitettiin reilulla ylikuormalla ja muut vaiheet olivat kuormittamattomia



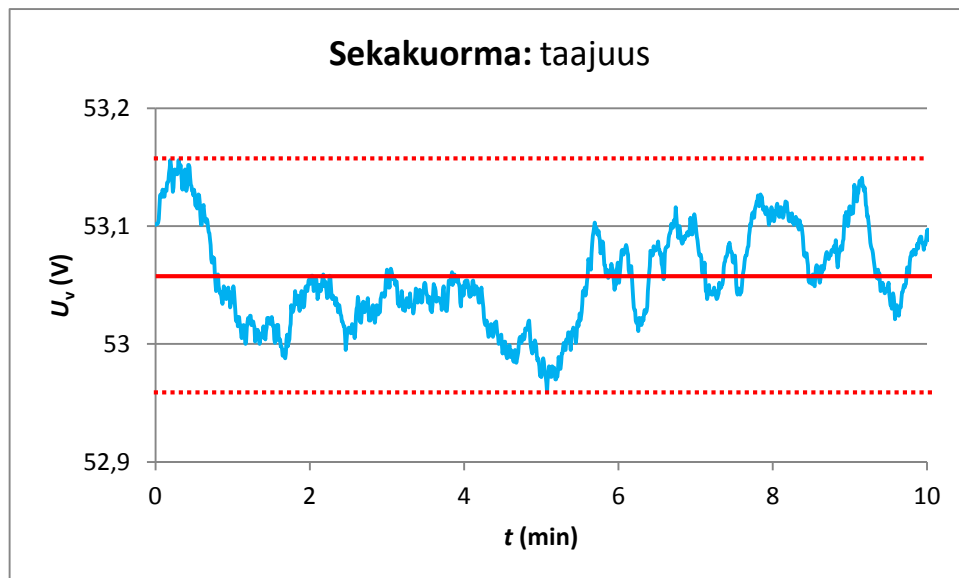
KUVIO 2.43 Varavoimakoneen vaihejännite U_{v1} , kun kuormana oli sekakuorma



KUVIO 2.44 Varavoimakoneen vaihejännite U_{v2} , kun kuormana oli sekakuorma



KUVIO 2.45 Varavoimakoneen vaihejännite U_{v3} , kun kuormana oli sekakuorma

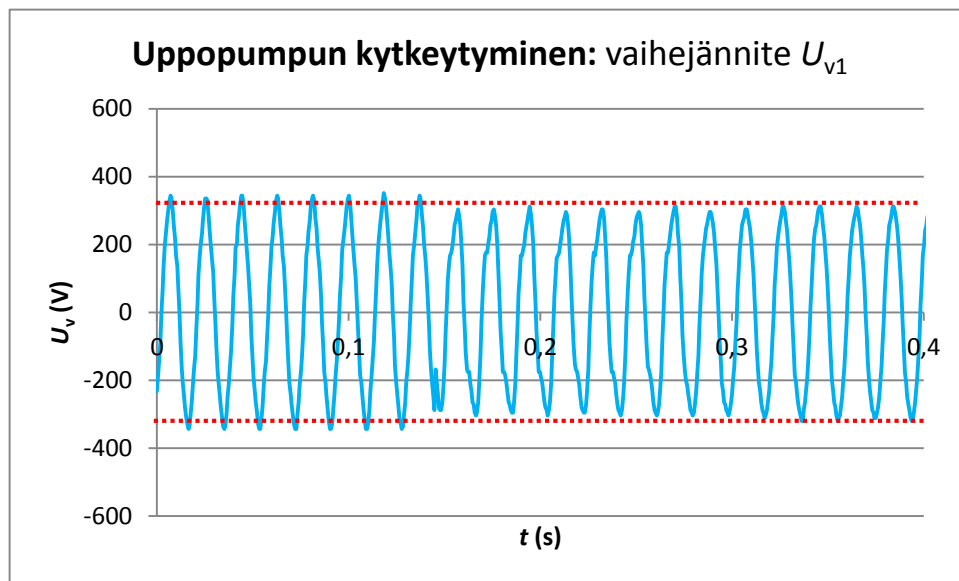


KUVIO 2.46 Varavoimakoneen taajuus, kun kuormana oli sekakuorma

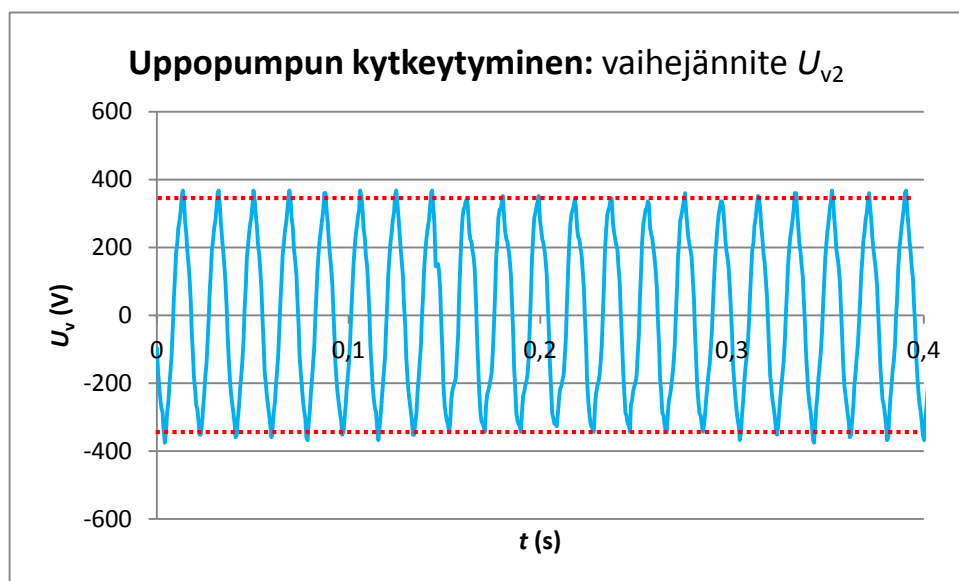
TAULUKKO 2.10 Varavoimakoneen vaihejännitteiden yliaallot, kun kuormana oli sekakuorma

Vaihejännite	3. yliaalto (%)	5. yliaalto (%)	7. yliaalto (%)	9. yliaalto (%)	11. yliaalto (%)	THD (%)
U_{v1}	1,5	7,4	2,2	0,4	1,0	8,6
U_{v2}	5,3	4,5	2,3	2,4	2,5	9,2
U_{v3}	4,8	7,2	1,6	2,3	1,5	10,0

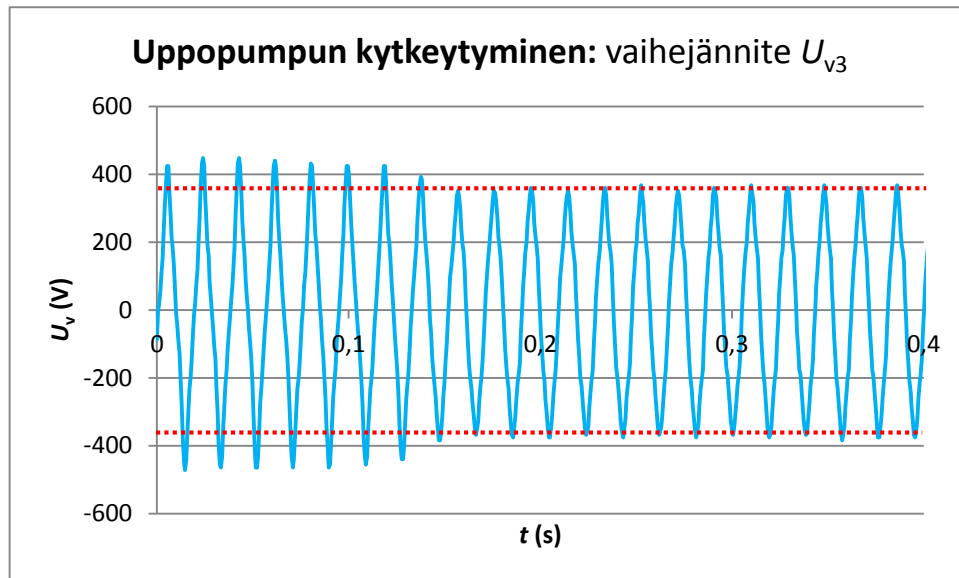
Liite 3. Kytentäilmiöiden mittaustulokset



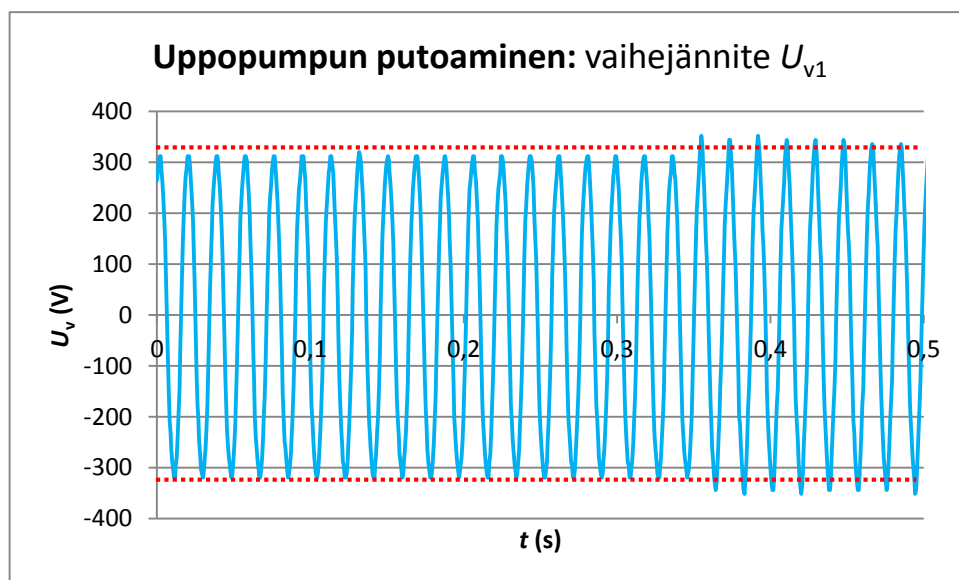
KUVIO 3.1 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu



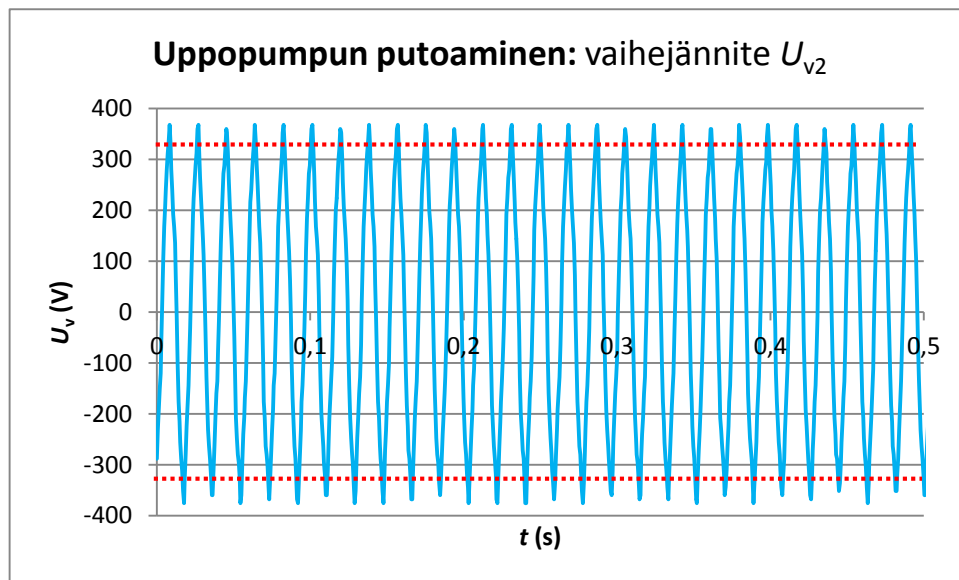
KUVIO 3.2 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu



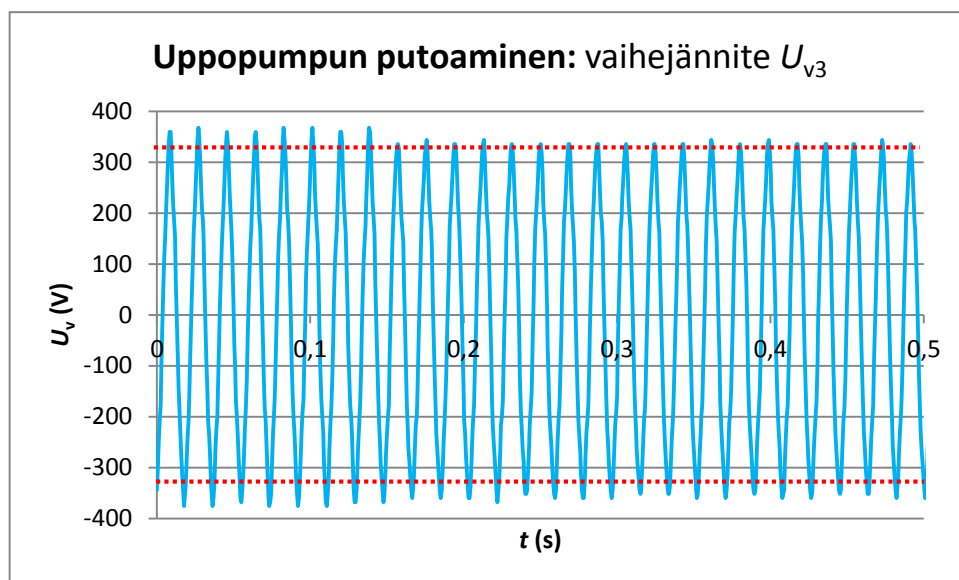
KUVIO 3.3 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu



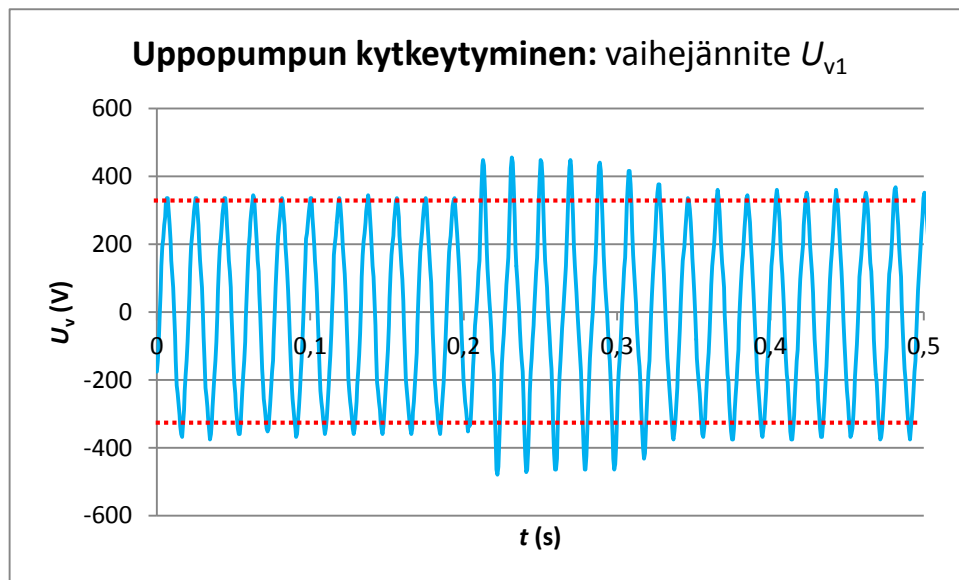
KUVIO 3.4 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi yksivaiheinen uppopumppu



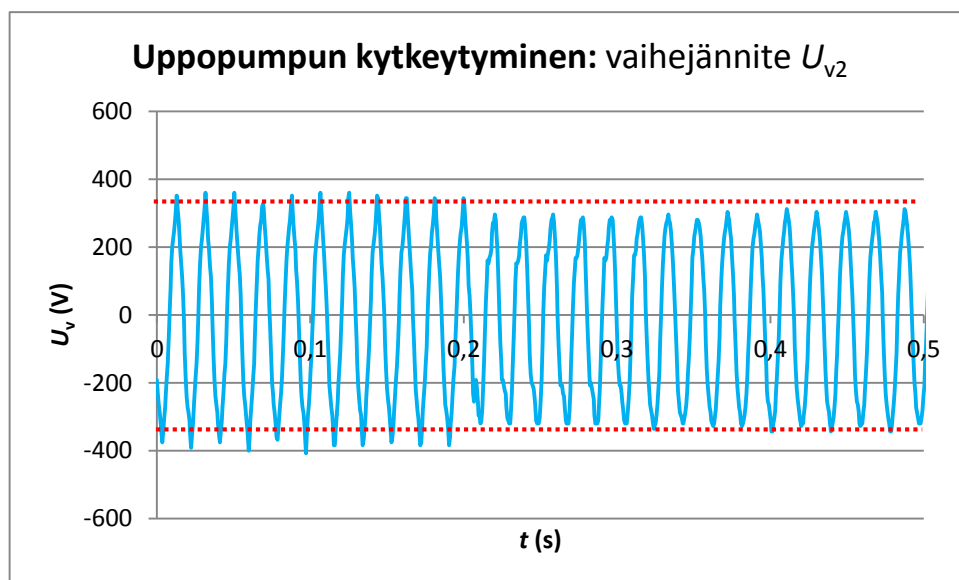
KUVIO 3.5 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi yksivaiheinen uppopumppu



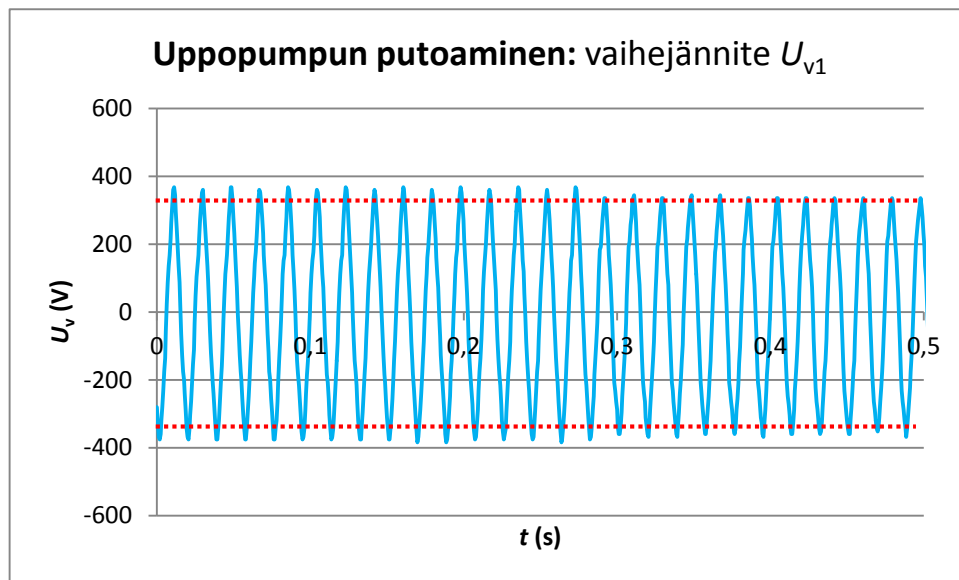
KUVIO 3.6 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi yksivaiheinen uppopumppu



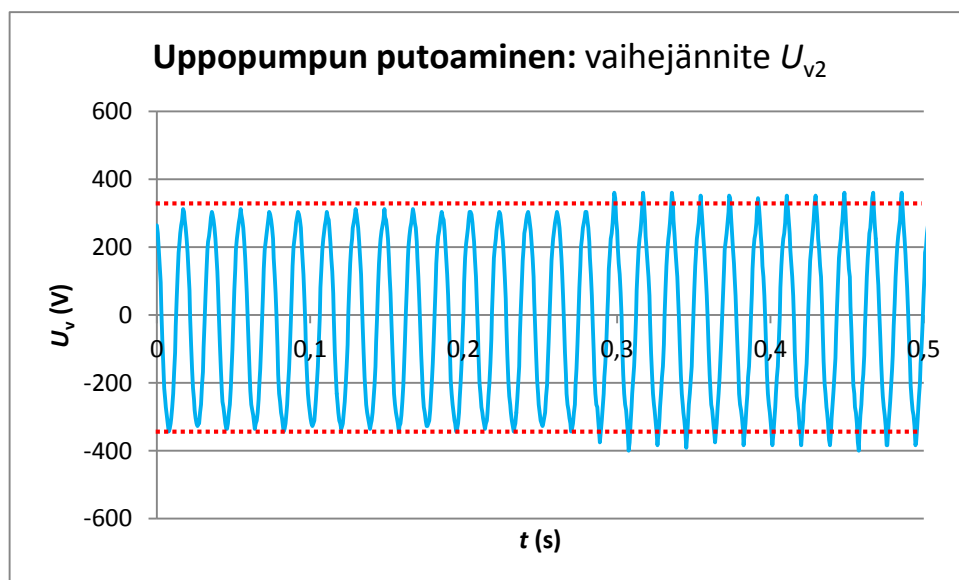
KUVIO 3.7 Varavoimakoneen kuormittamattoman L1-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun L2-vaiheen yksivaihepistorasiaan kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu



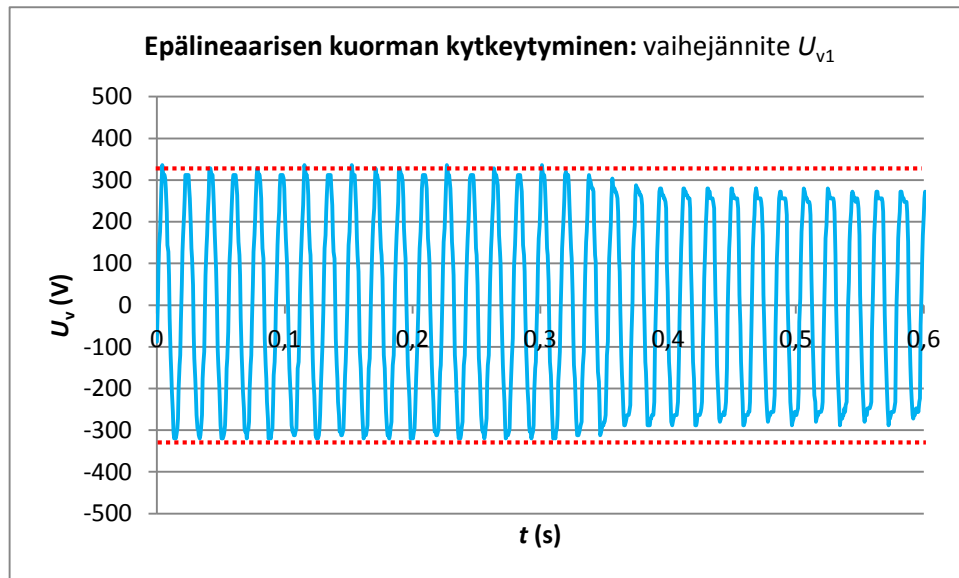
KUVIO 3.8 Varavoimakoneen kuormitetun L2-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siihen kytkeytyi yksivaiheinen uppopumppu



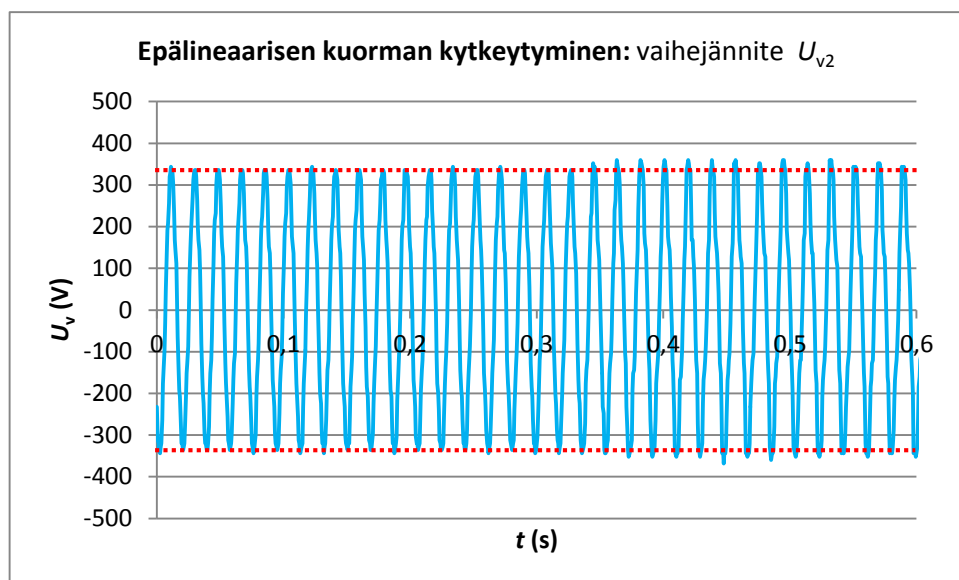
KUVIO 3.9 Varavoimakoneen kuormittamattoman L1-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun L2-vaiheen yksivaihepistorasiasta putosi yksivaiheinen uppopumppu



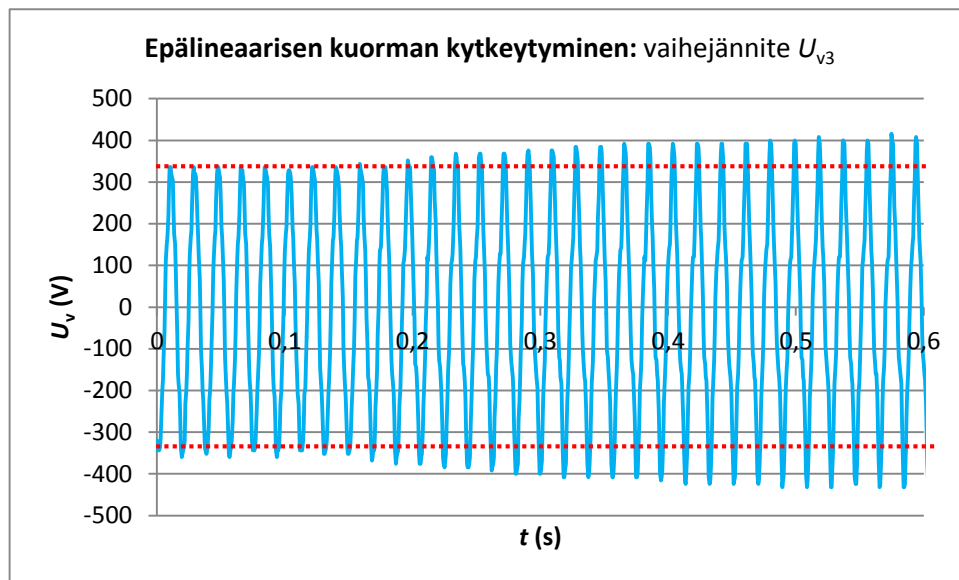
KUVIO 3.10 Varavoimakoneen kuormitetun L2-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siitä putosi yksivaiheinen uppopumppu



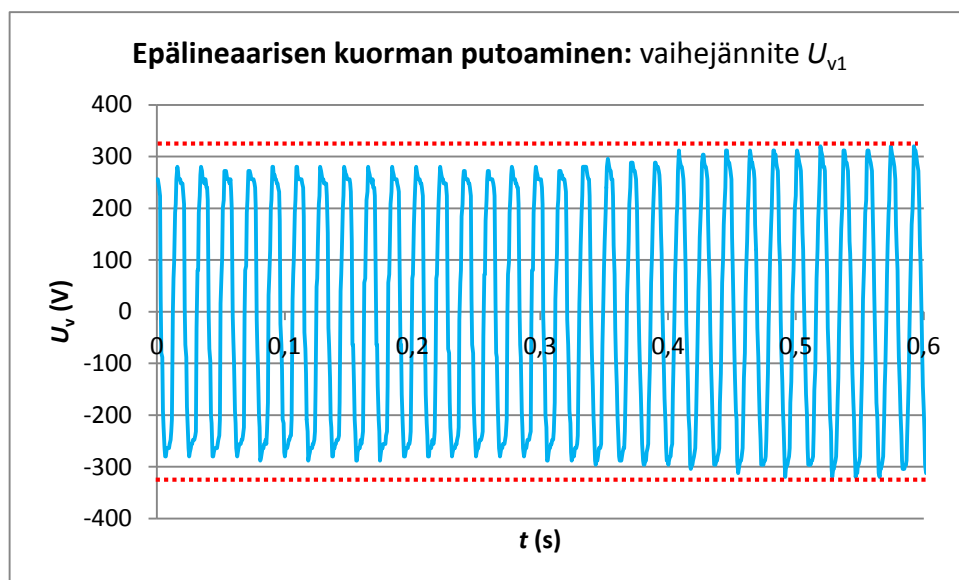
KUVIO 3.11 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi epälineaarinen kuorma



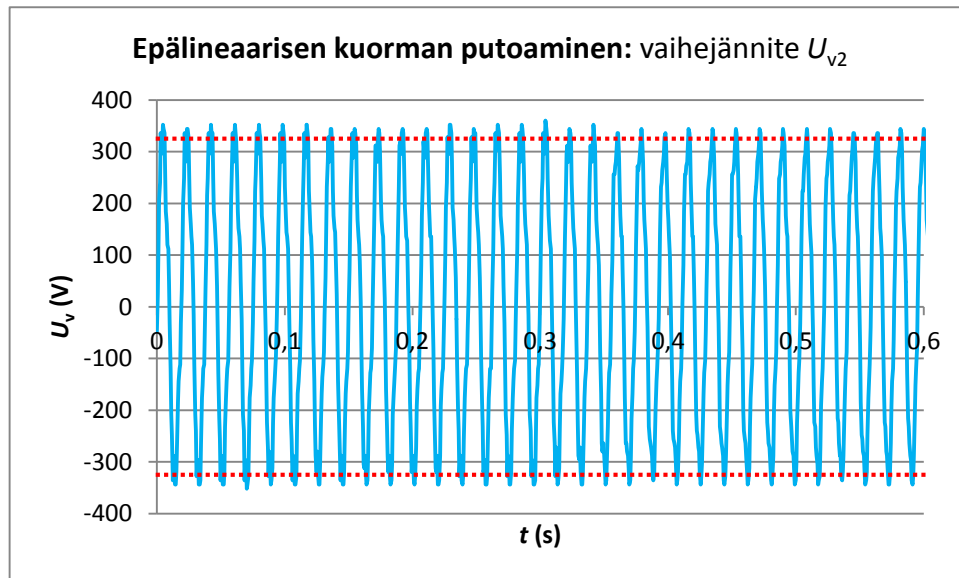
KUVIO 3.12 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi epälineaarinen kuorma



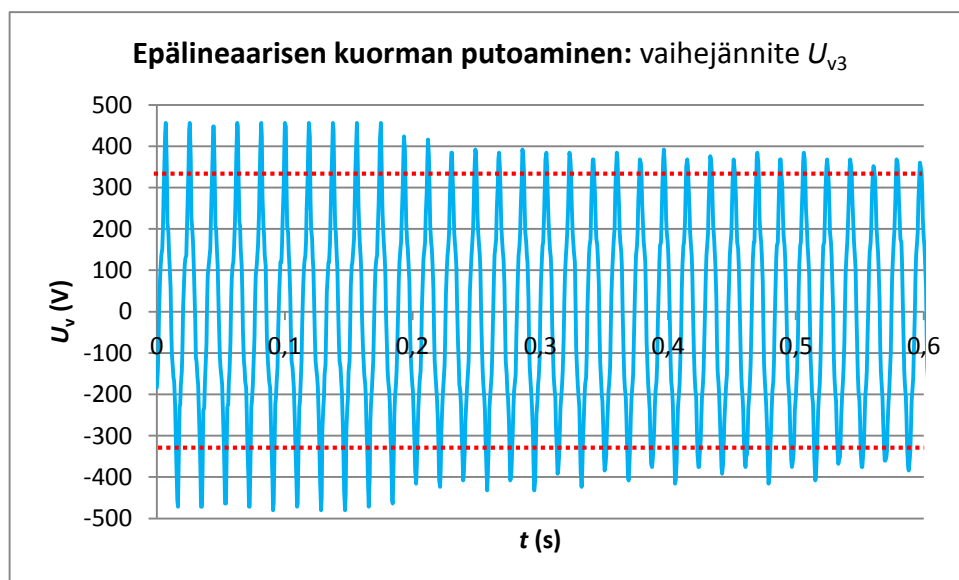
KUVIO 3.13 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheeseen kytkeytyi epälineaarinen kuorma



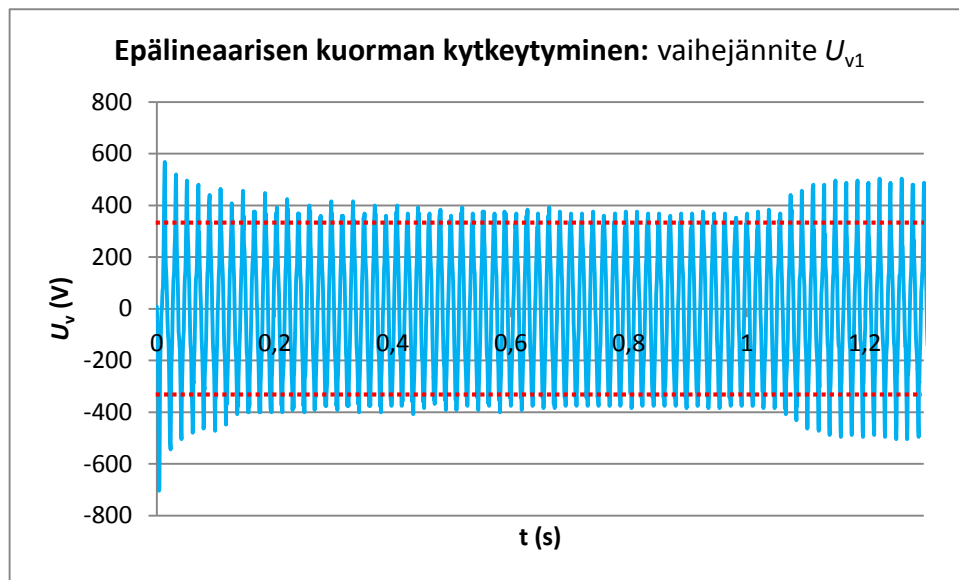
KUVIO 3.14 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi epälineaarinen kuorma



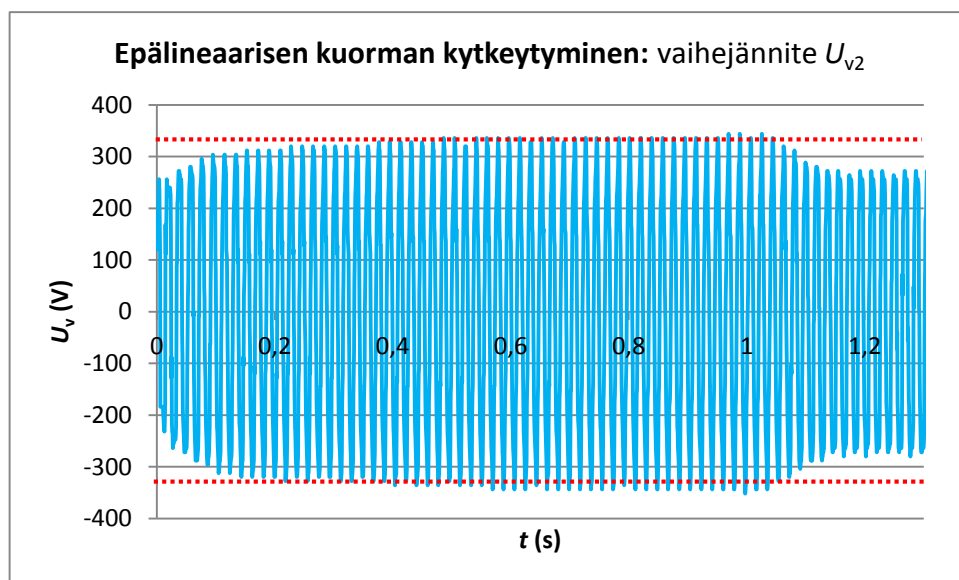
KUVIO 3.15 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi epälineaarinen kuorma



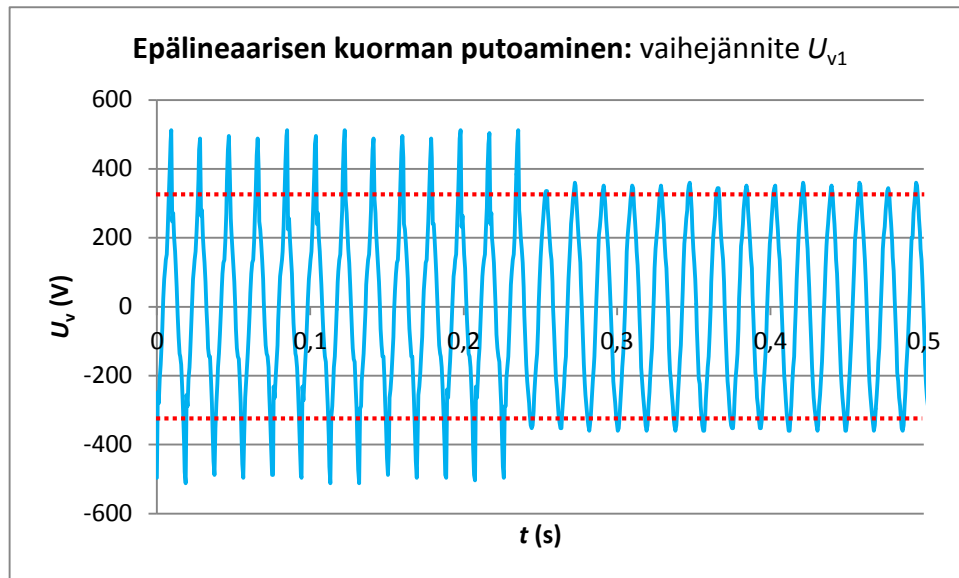
KUVIO 3.16 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasian L1-vaiheesta putosi epälineaarinen kuorma



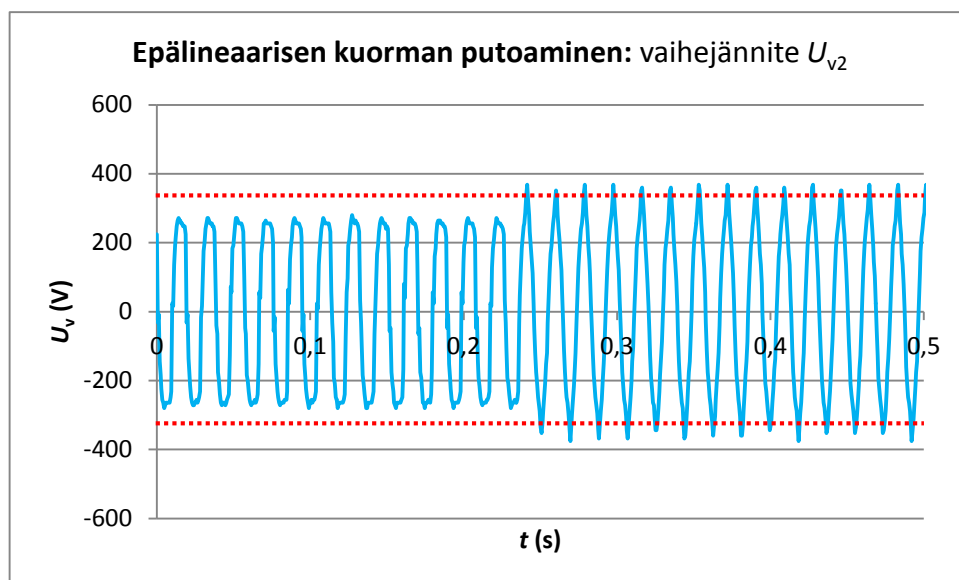
KUVIO 3.17 Kuormittamattoman yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun vaiheeseen L2 kytkeytyi samanaikaisesti epälineaarinen kuorma sekä keinokeskuksen tuulettimet



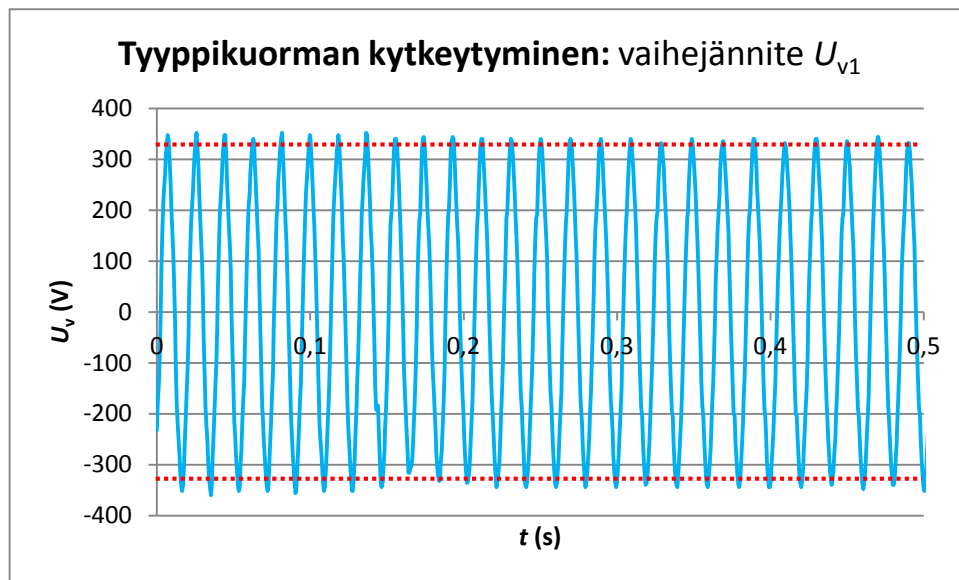
KUVIO 3.18 Kuormitetun L2 vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siihen kytkeytyi samanaikaisesti epälineaarinen kuorma sekä keinokeskuksen tuulettimet



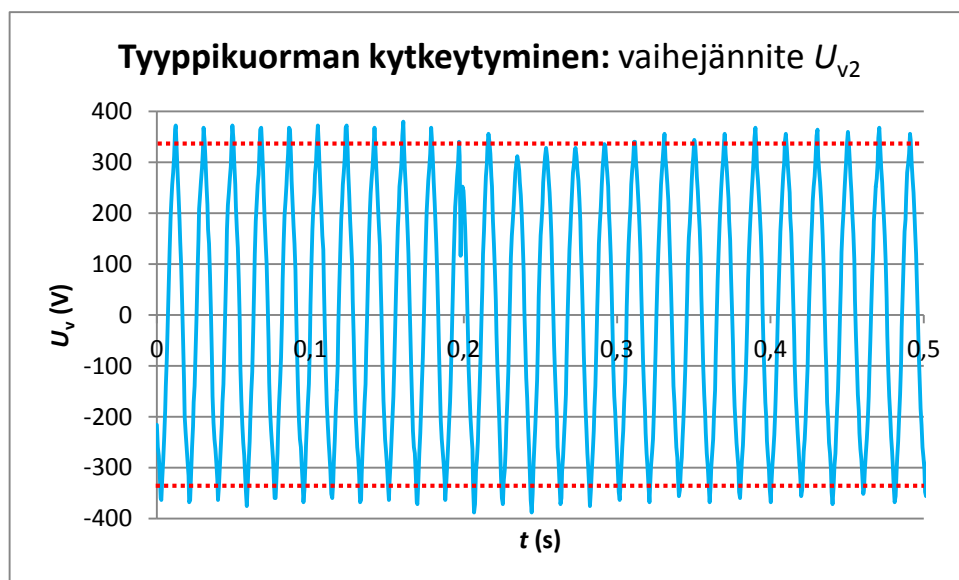
KUVIO 3.19 Kuormittamattoman yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun vaiheesta L2 putosi samanaikaisesti epälineaarinen kuorma sekä keinokeskuksen tuulettimet



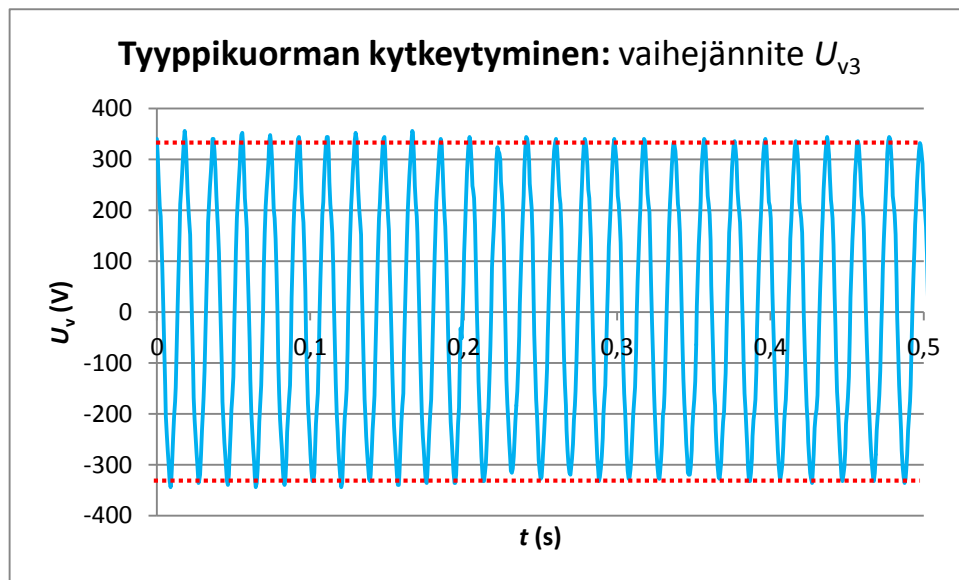
KUVIO 3.20 Kuormitetun L2 vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siitä putosi samanaikaisesti epälineaarinen kuorma sekä keinokeskuksen tuulettimet



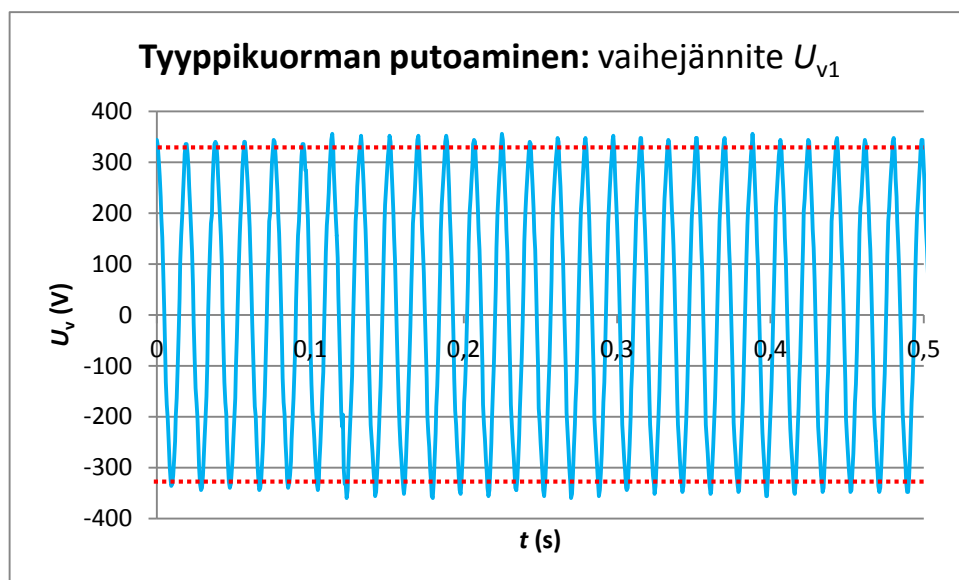
KUVIO 3.21 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



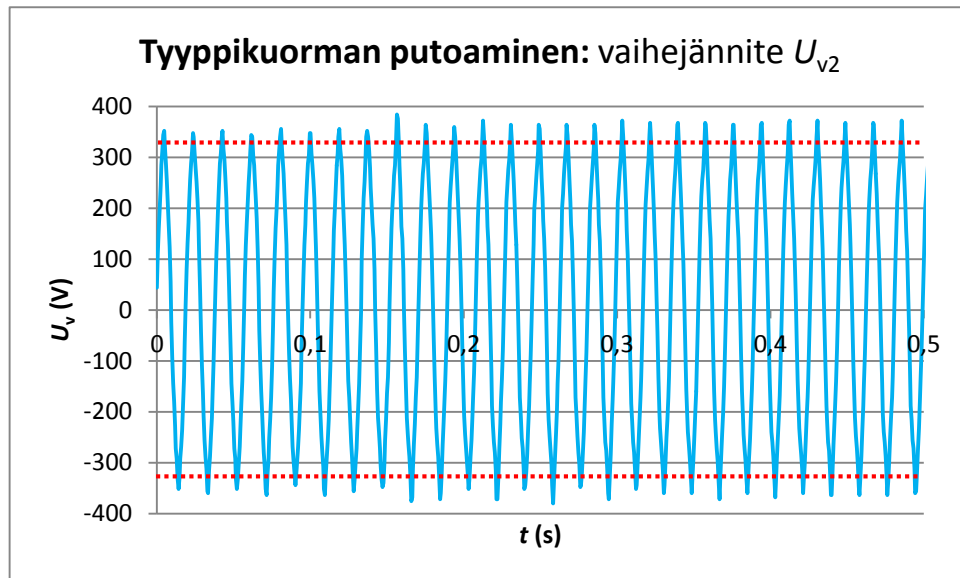
KUVIO 3.22 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



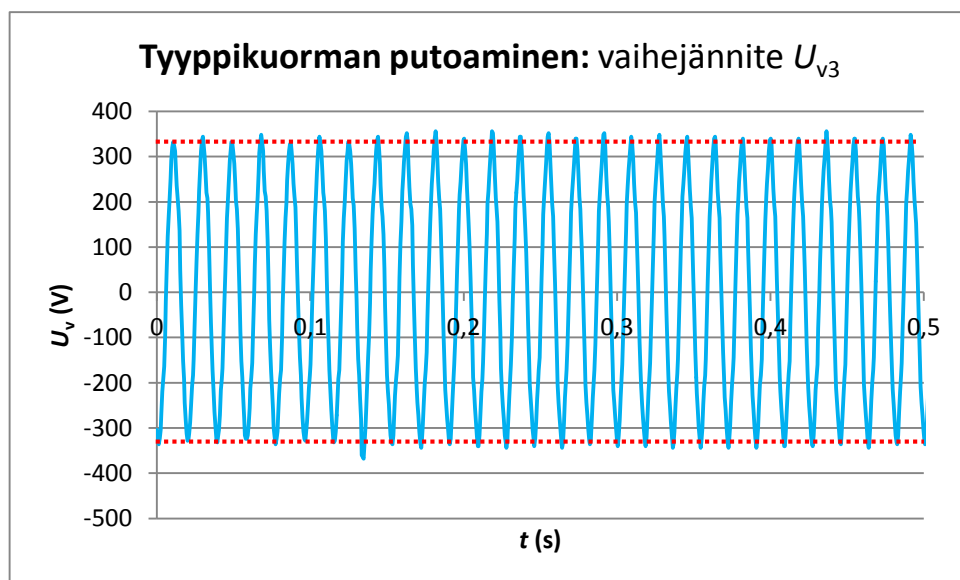
KUVIO 3.23 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



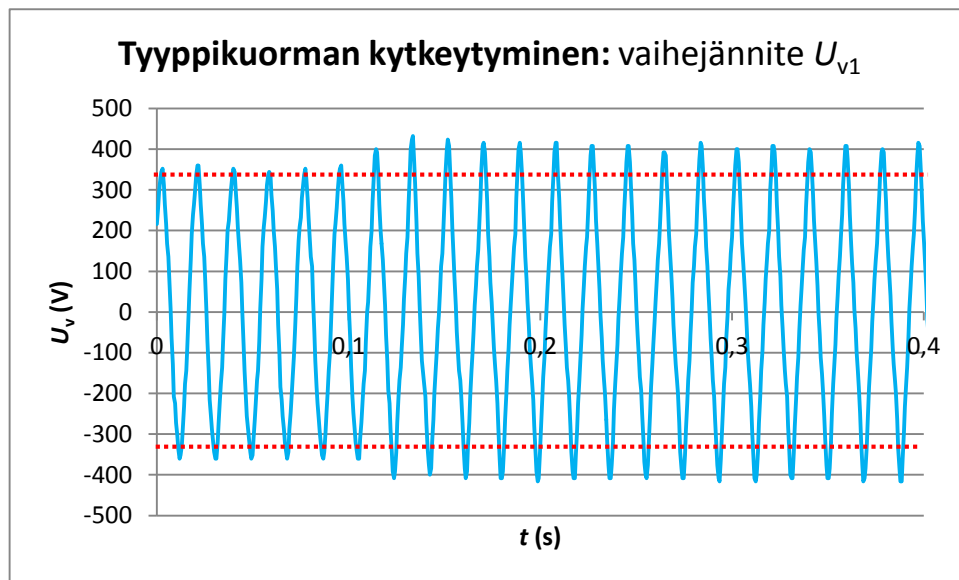
KUVIO 3.24 Vaihejännite U_{v1} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



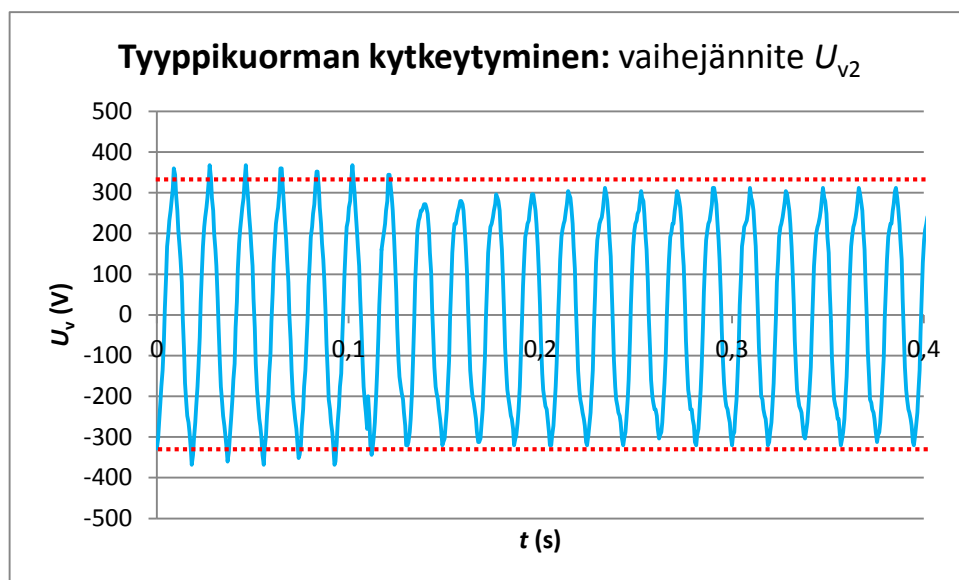
KUVIO 3.25 Vaihejännite U_{v2} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



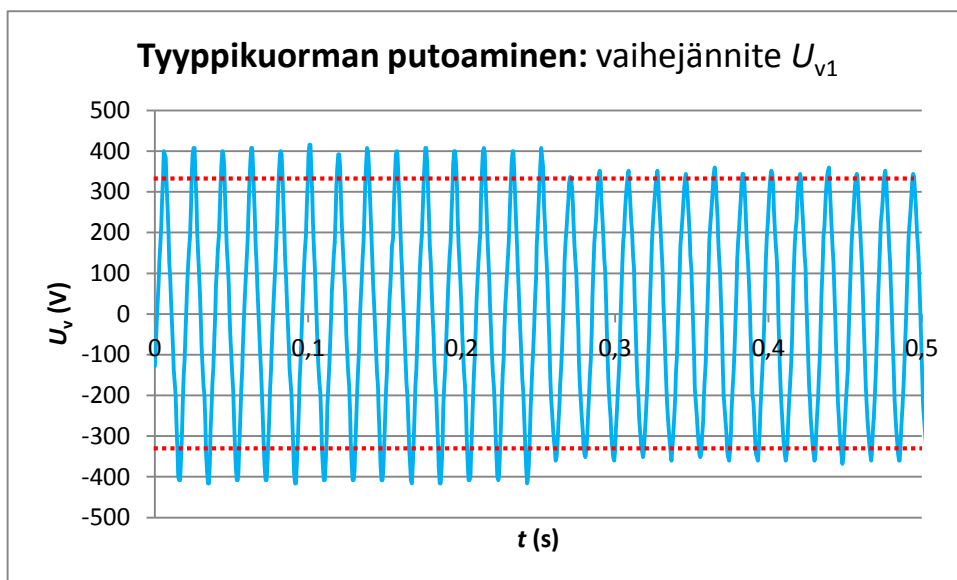
KUVIO 3.26 Vaihejännite U_{v3} , kun varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan kytkeytyi kolmivaiheinen 100 %:n tyypikuorma



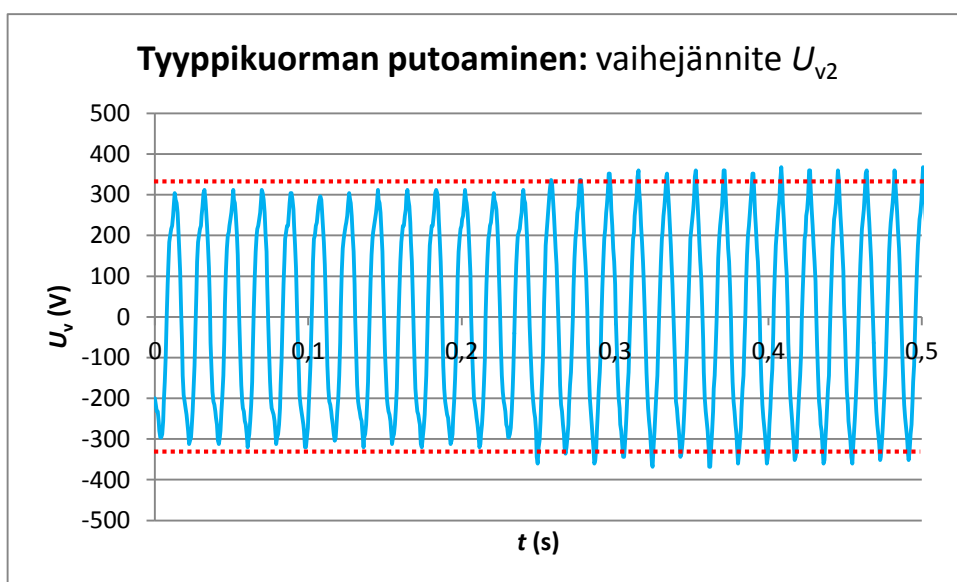
KUVIO 3.27 Kuormittamattoman L1-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun vaiheen L2 yksivaihepistorasiaan kytkettiin 100 %:n tyypikuorma



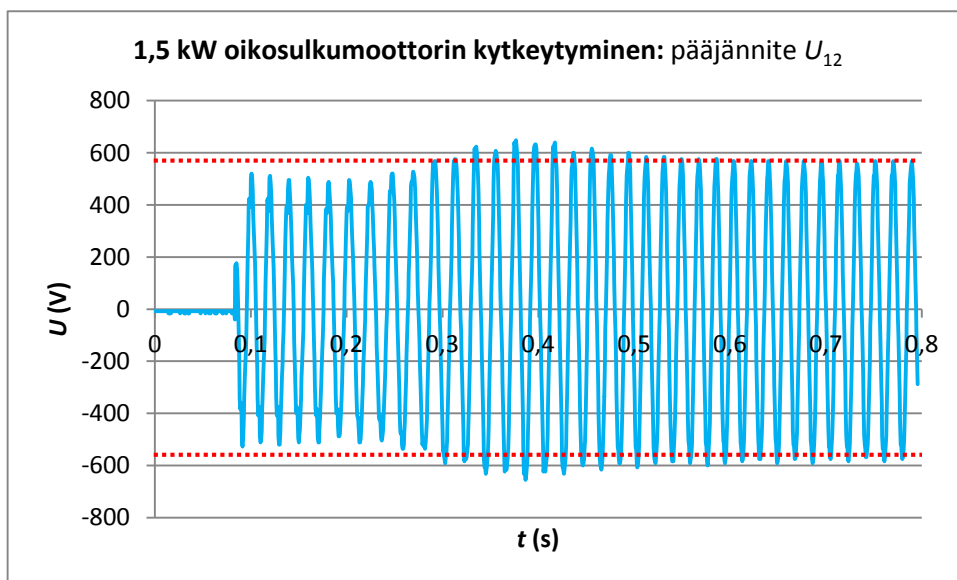
KUVIO 3.28 Kuormitetun L2-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siihen kytkettiin 100 %:n tyypikuorma



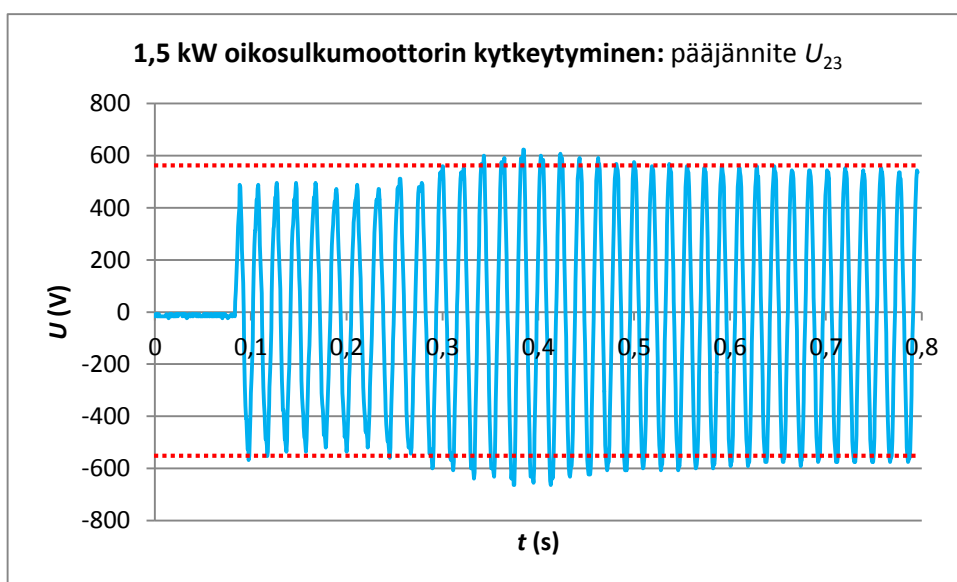
KUVIO 3.29 Kuormittamattoman L1-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v1} , kun vaiheen L2 yksivaihepistorasiasta putosi 100 %:n tyypikuorma



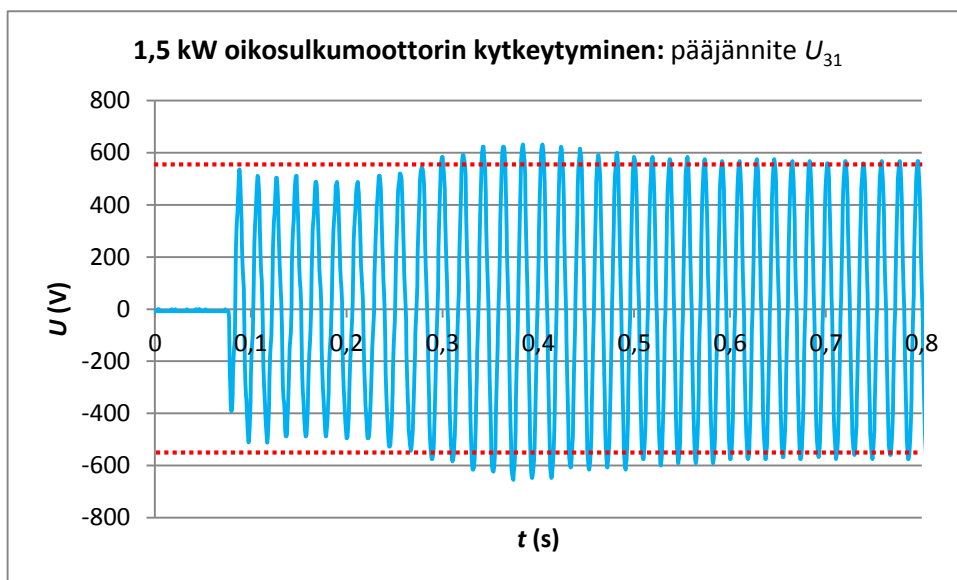
KUVIO 3.30 Kuormitetun L2-vaiheen yksivaihepistorasian jännite U_{v2} , kun siitä putosi 100 %:n tyypikuorma



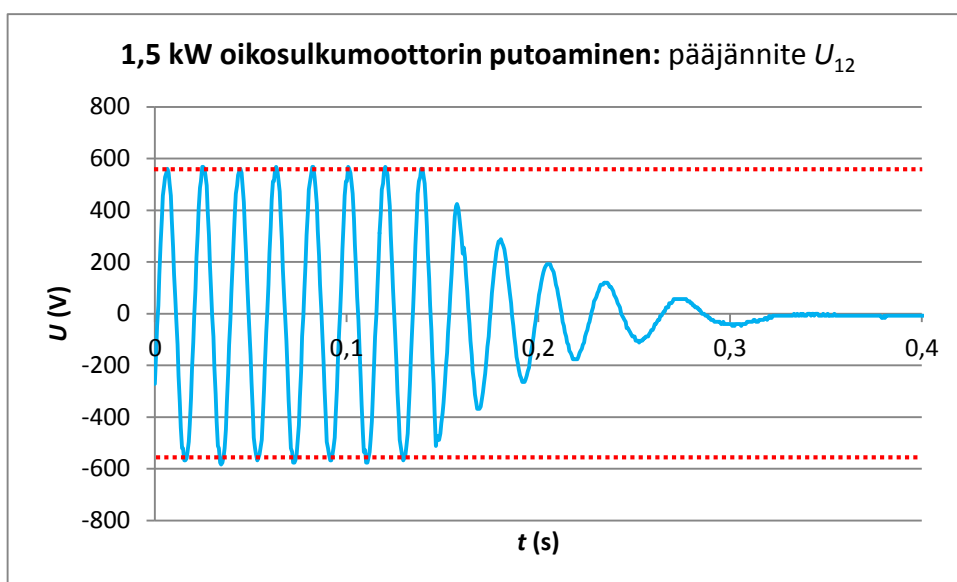
KUVIO 3.31 Pääjännite U_{12} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



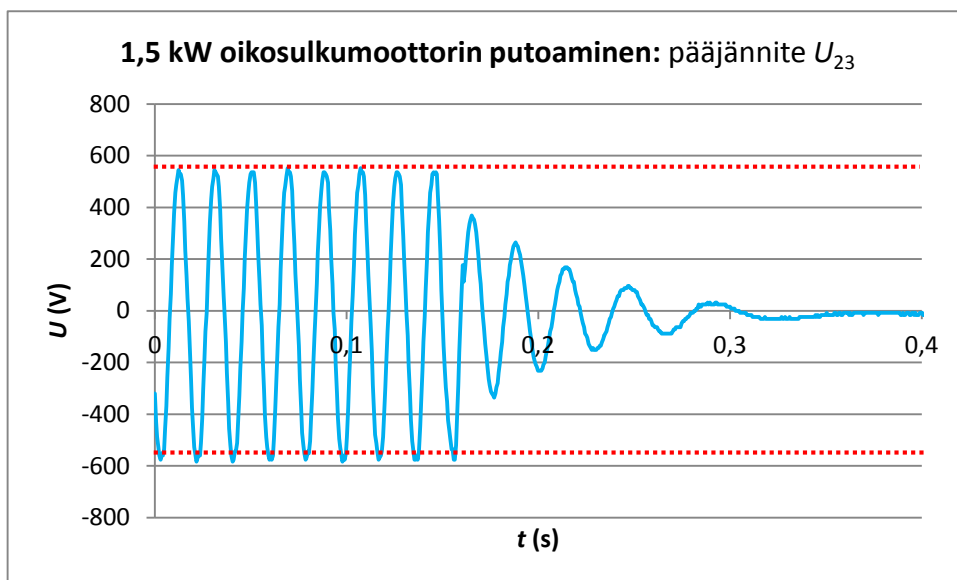
KUVIO 3.32 Pääjännite U_{23} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



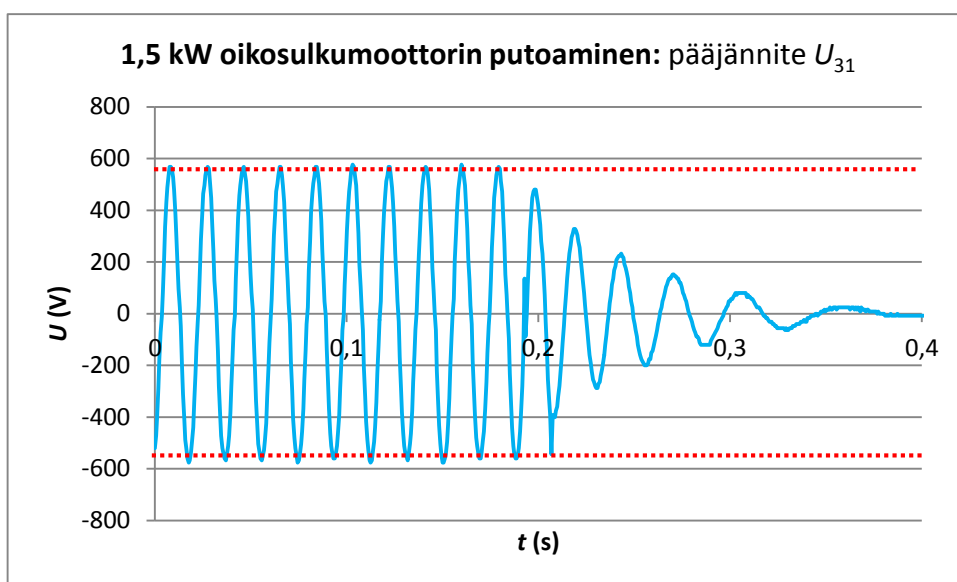
KUVIO 3.32 Pääjännite U_{31} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



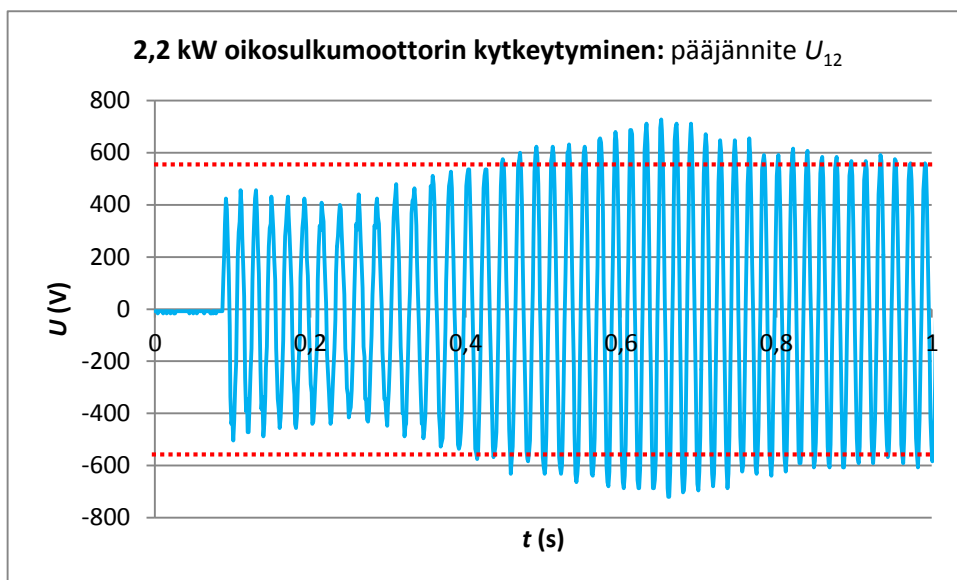
KUVIO 3.33 Pääjännite U_{12} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta



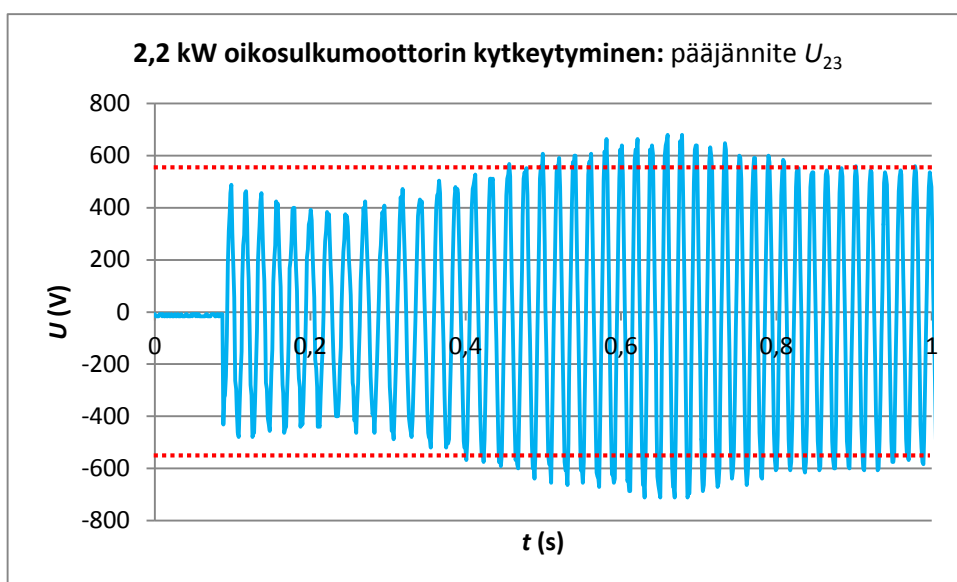
KUVIO 3.35 Pääjännite U_{23} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta



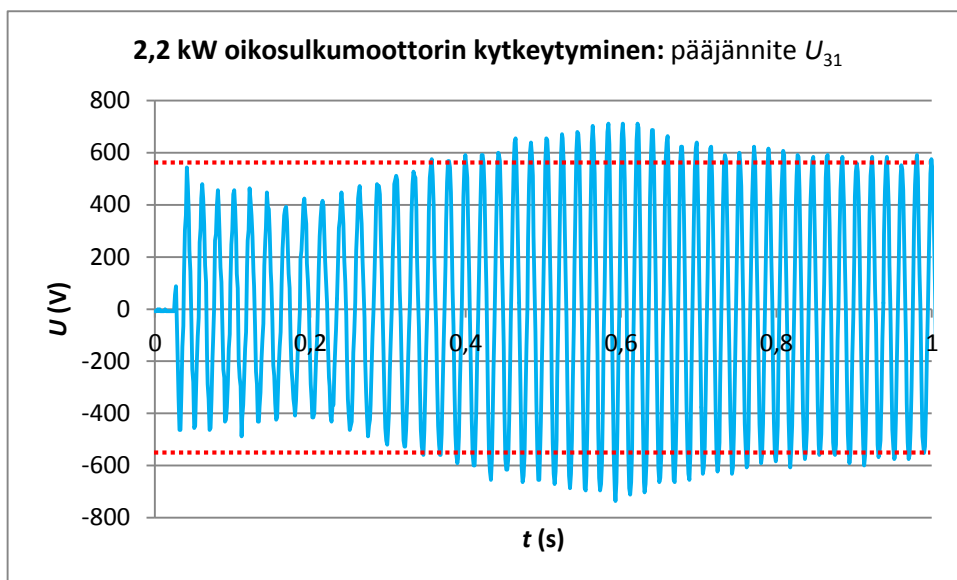
KUVIO 3.36 Pääjännite U_{31} , kun 1,5 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen pistorasiasta



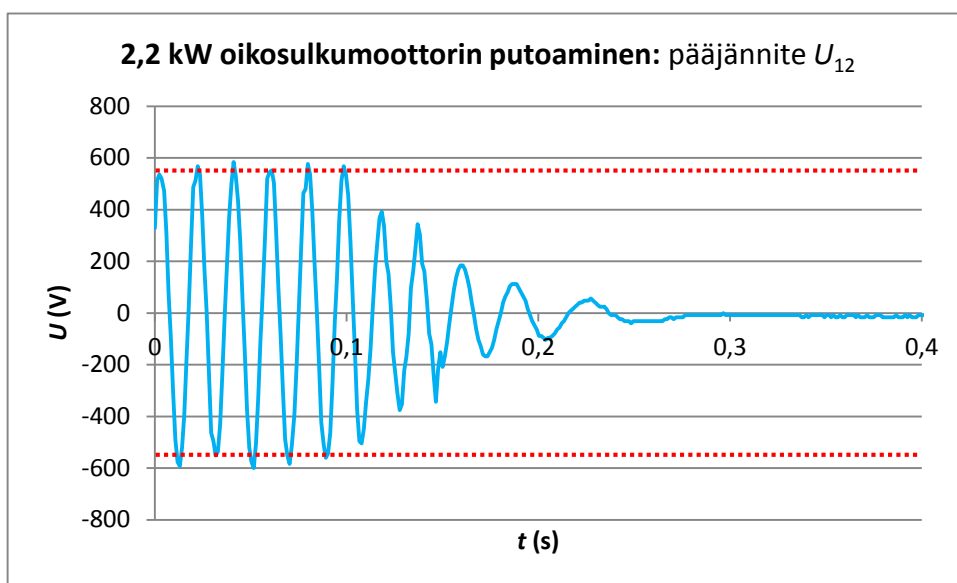
KUVIO 3.37 Pääjännite U_{12} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



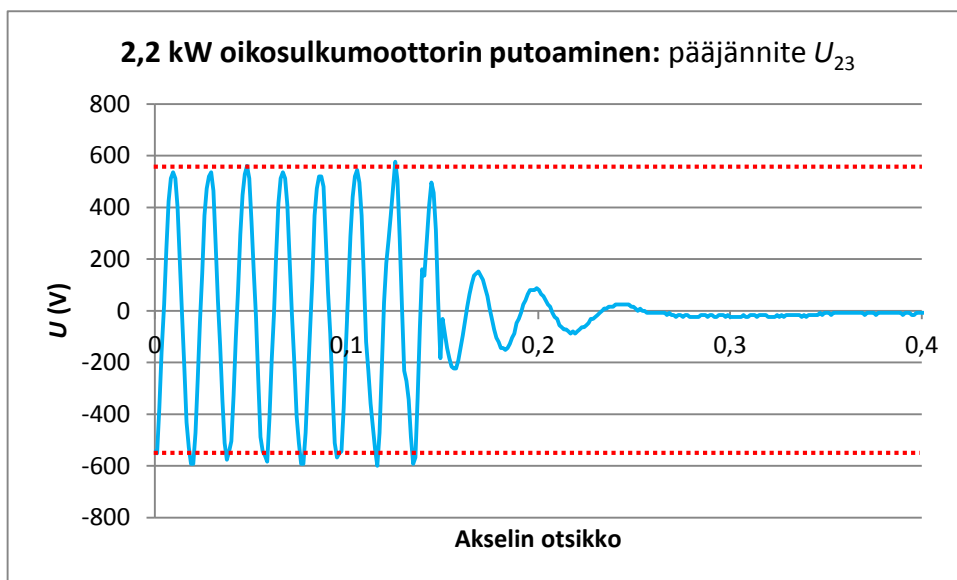
KUVIO 3.38 Pääjännite U_{23} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



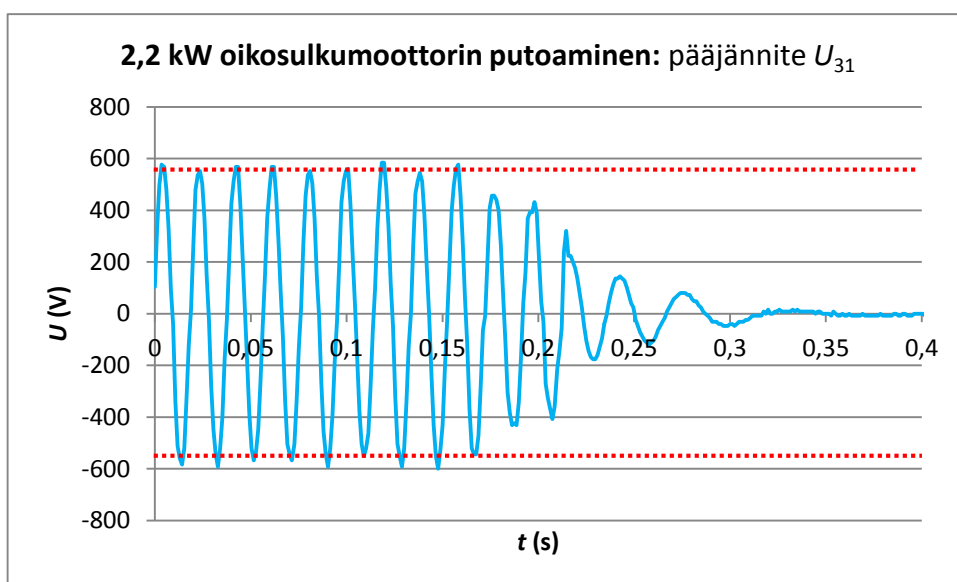
KUVIO 3.39 Pääjännite U_{31} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori kytkeytyi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



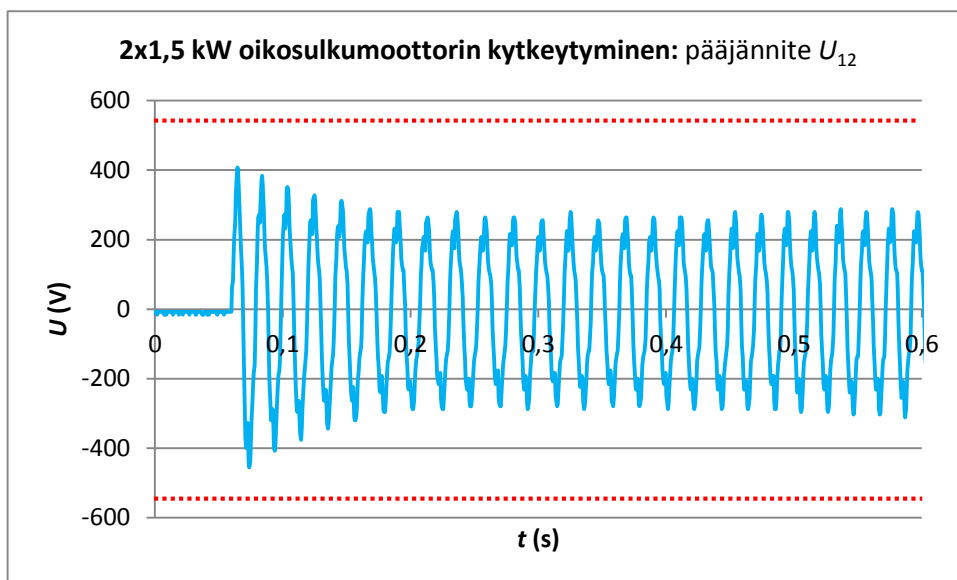
KUVIO 3.40 Pääjännite U_{12} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta



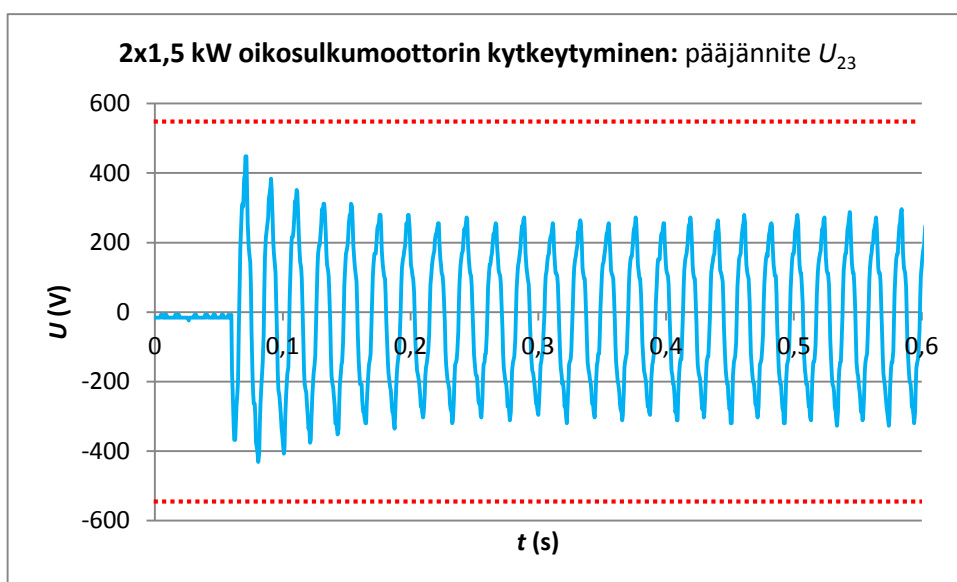
KUVIO 3.41 Pääjännite U_{23} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta



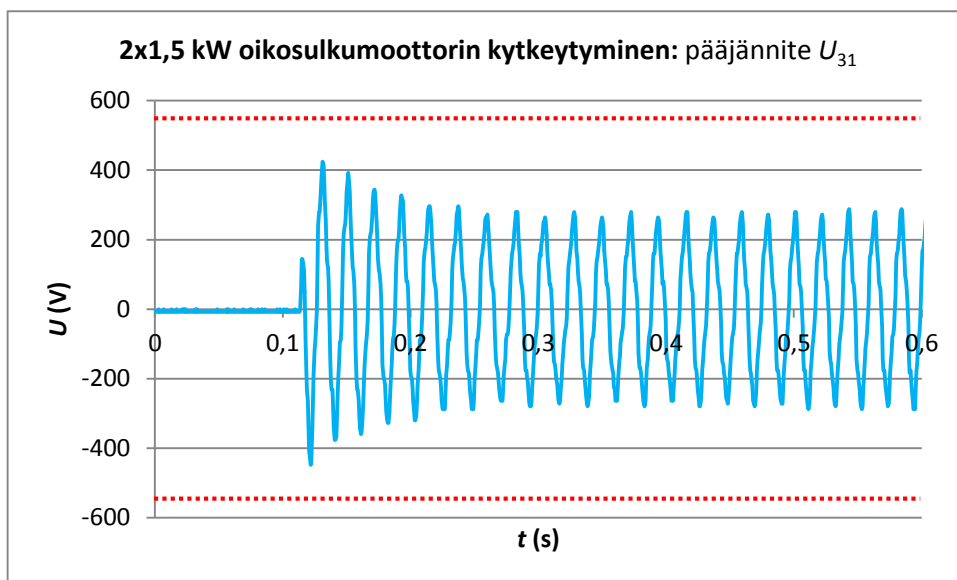
KUVIO 3.42 Pääjännite U_{31} , kun 2,2 kW:n oikosulkumoottori putosi varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta



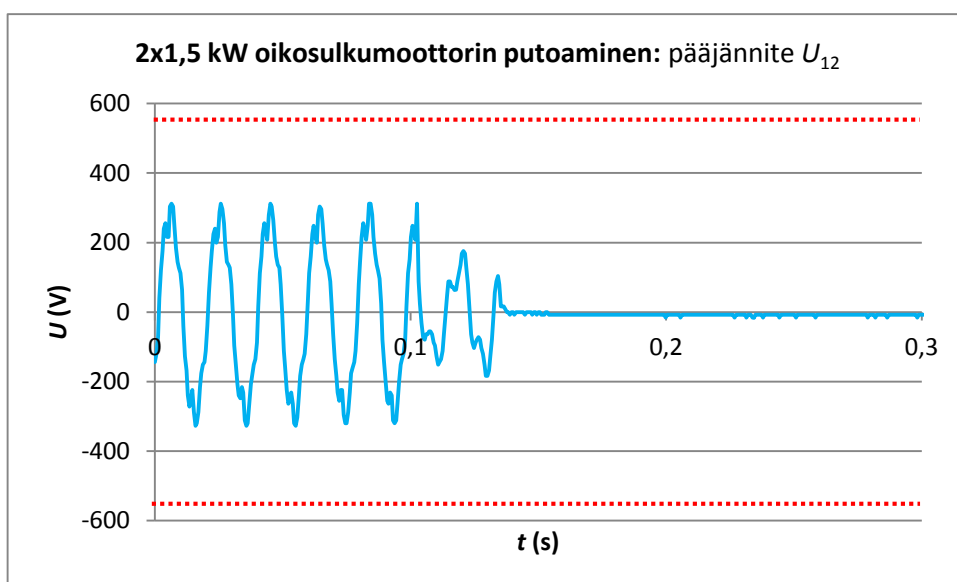
KUVIO 3.43 Pääjännite U_{12} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria kytkeytyi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



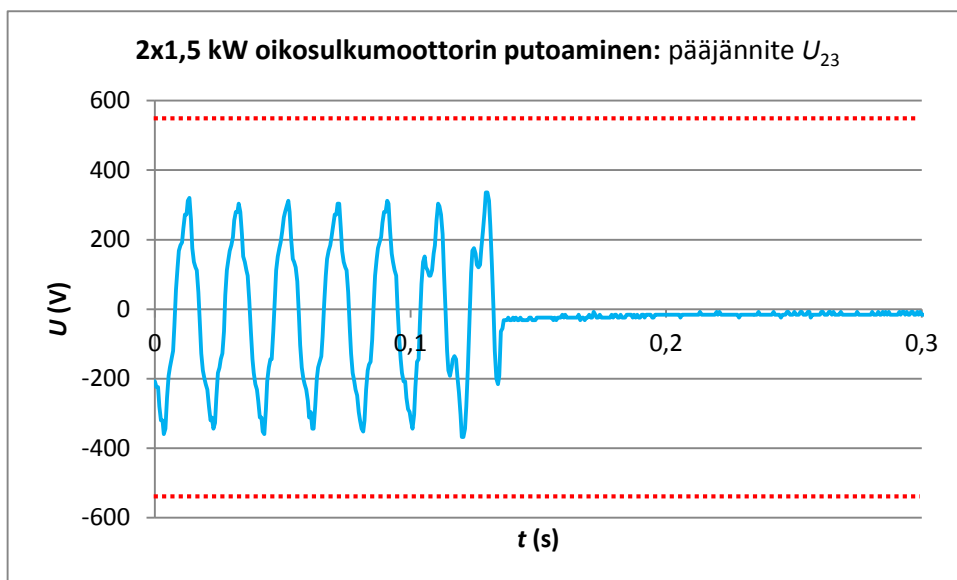
KUVIO 3.44 Pääjännite U_{23} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria kytkeytyi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



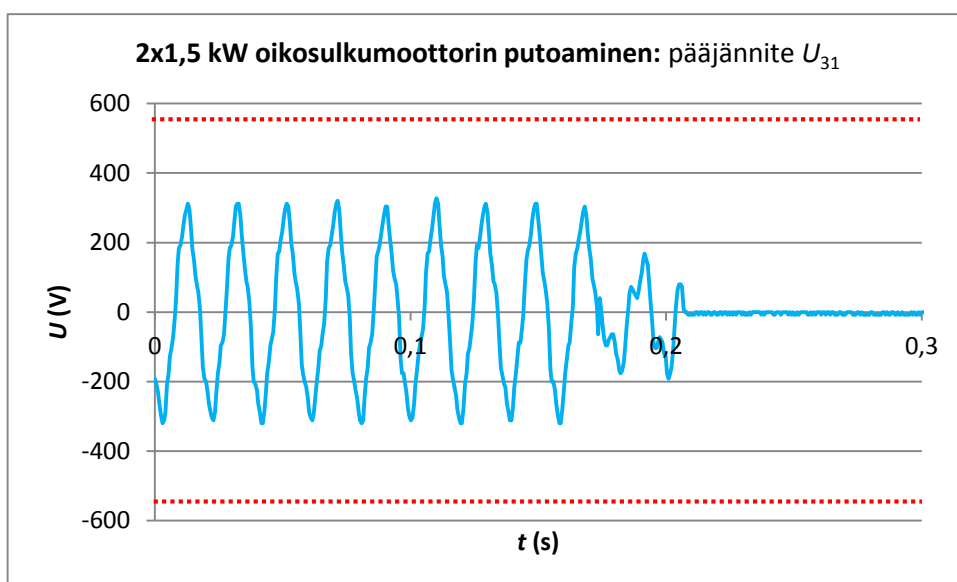
KUVIO 3.45 Pääjännite U_{31} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria kytkeytyi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiaan



KUVIO 3.46 Pääjännite U_{12} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria putosi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta

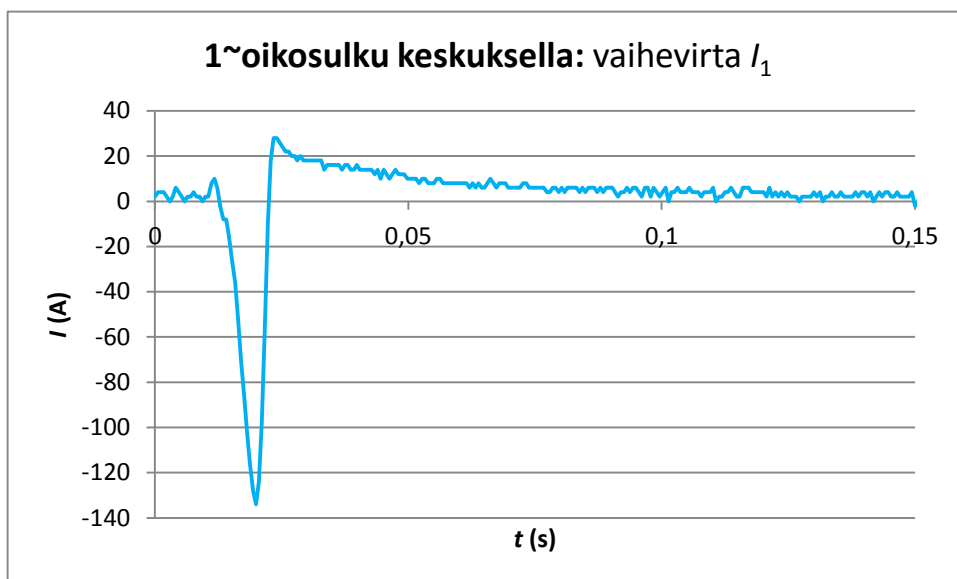


KUVIO 3.47 Pääjännite U_{23} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria putosi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta

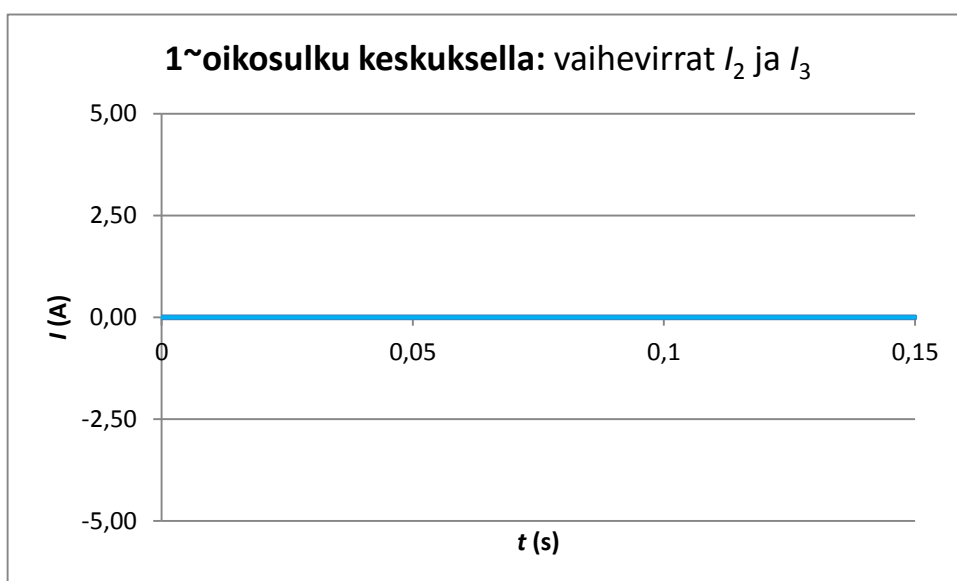


KUVIO 3.48 Pääjännite U_{31} , kun kaksi 1,5 kW:n oikosulkumoottoria putosi samanaikaisesti varavoimakoneen kolmivaihepistorasiasta

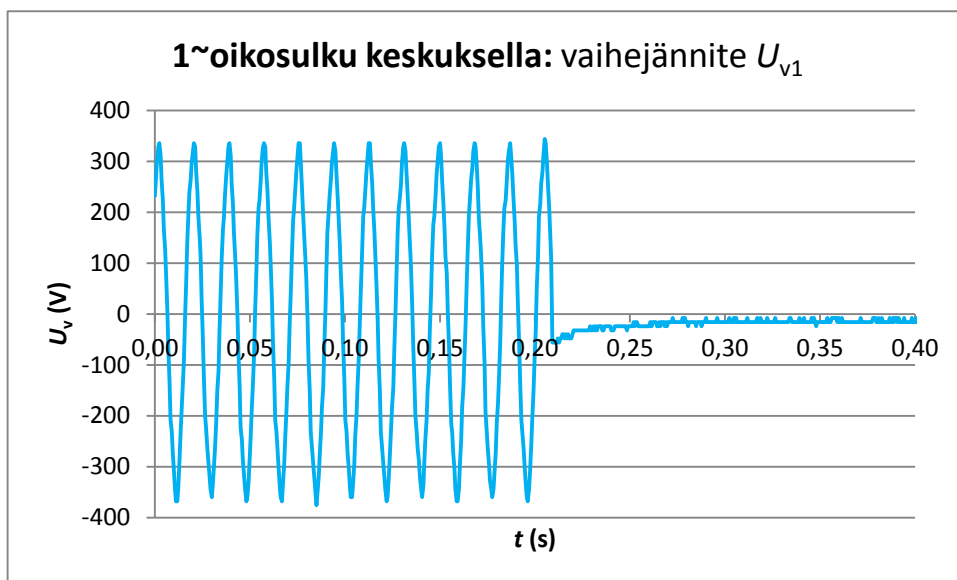
Liite 4. Vikatilanteiden mittaustulokset



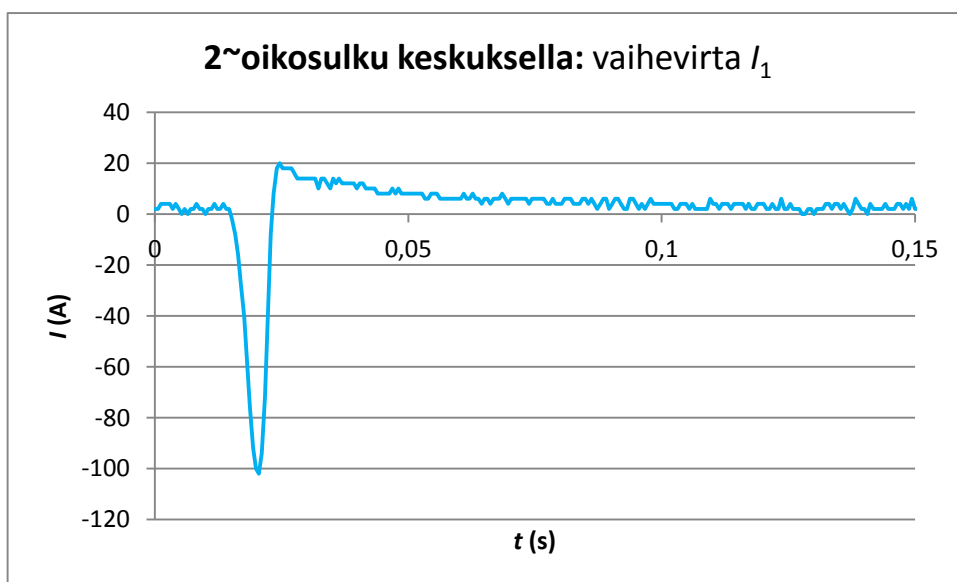
KUVIO 4.1 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun keskuksella syntyi yksivaiheinen oikosulku



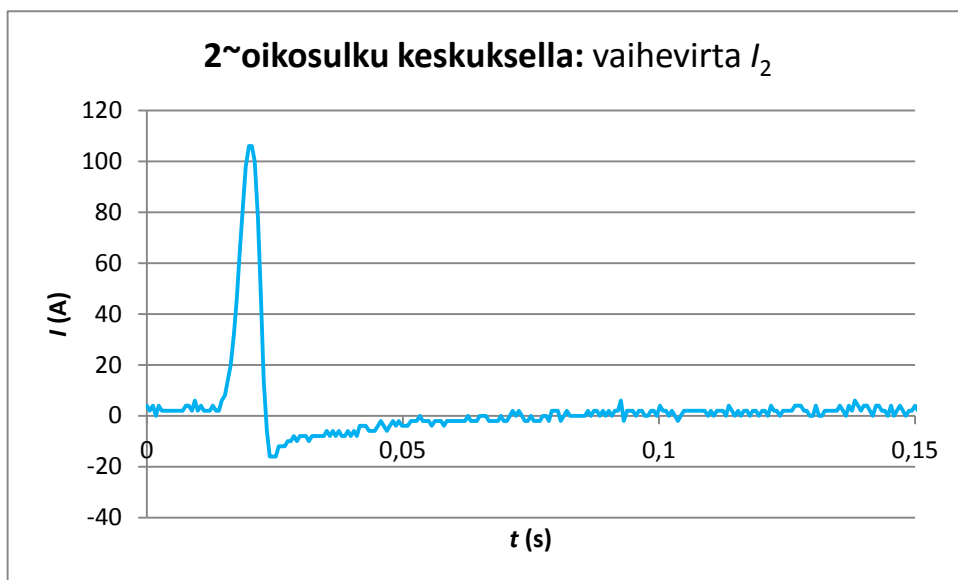
KUVIO 4.2 Varavoimakoneen syöttämät vaihevirrat I_2 ja I_3 , kun keskuksella syntyi yksivaiheinen oikosulku



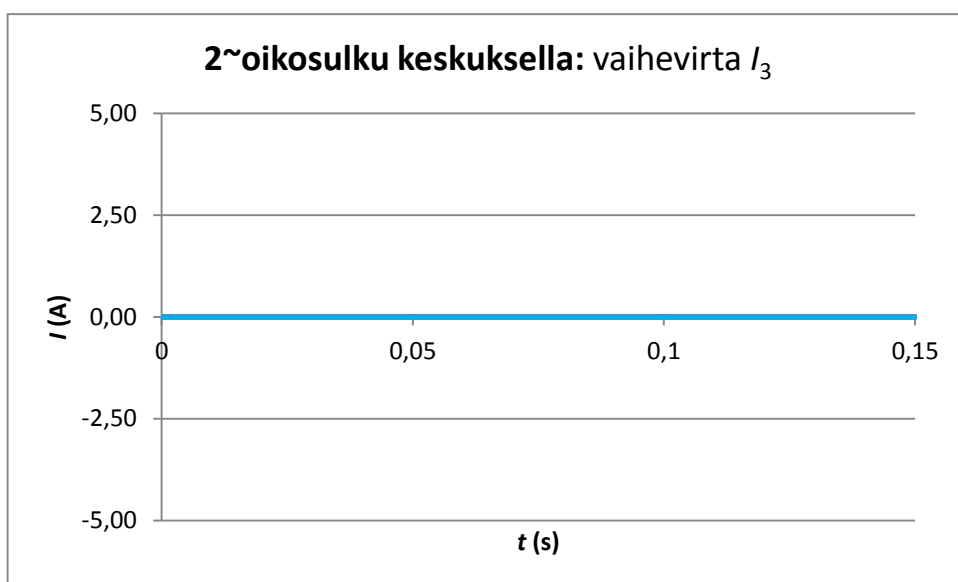
KUVIO 4.3 Vaihejännite U_{v1} , kun keskuksella syntyi yksivaiheinen oikosulku



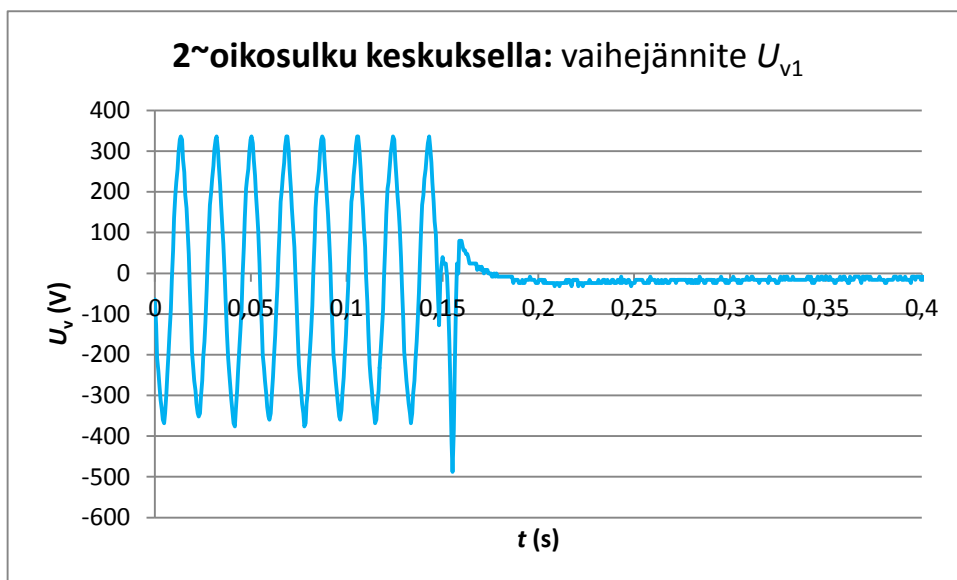
KUVIO 4.4 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun keskuksella syntyi kaksivaiheinen oikosulku



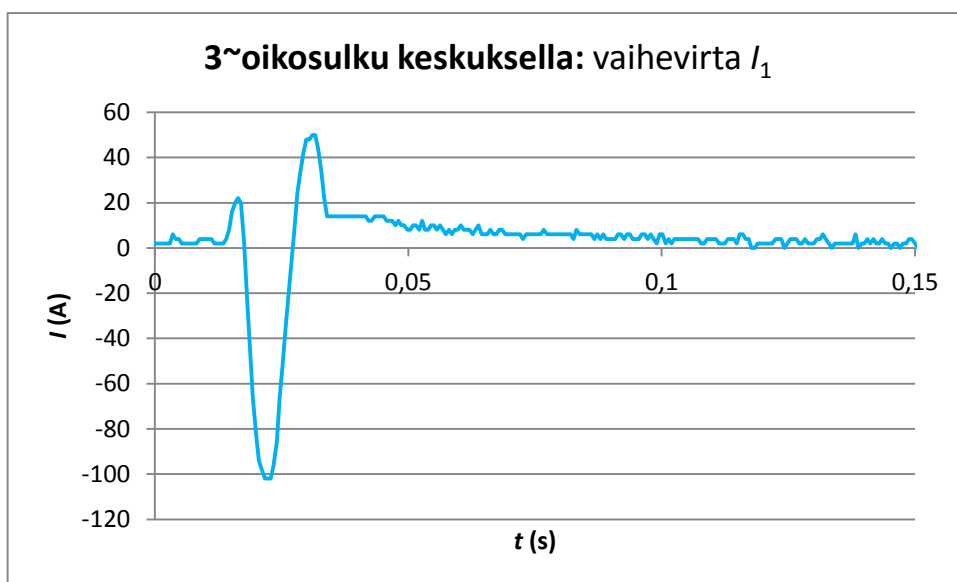
KUVIO 4.5 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_2 , kun keskuksella syntyi kaksivaiheinen oikosulku



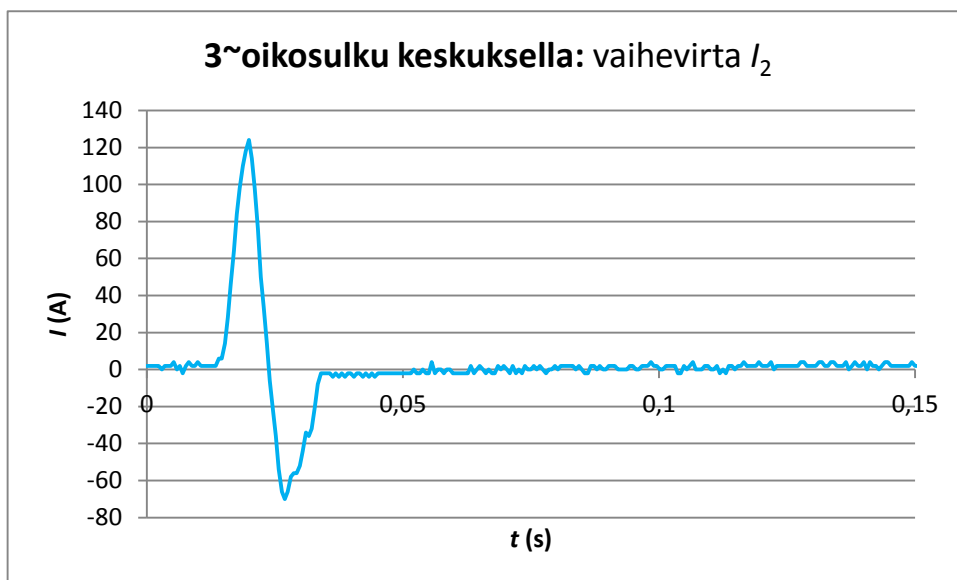
KUVIO 4.6 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_3 , kun keskuksella syntyi kaksivaiheinen oikosulku



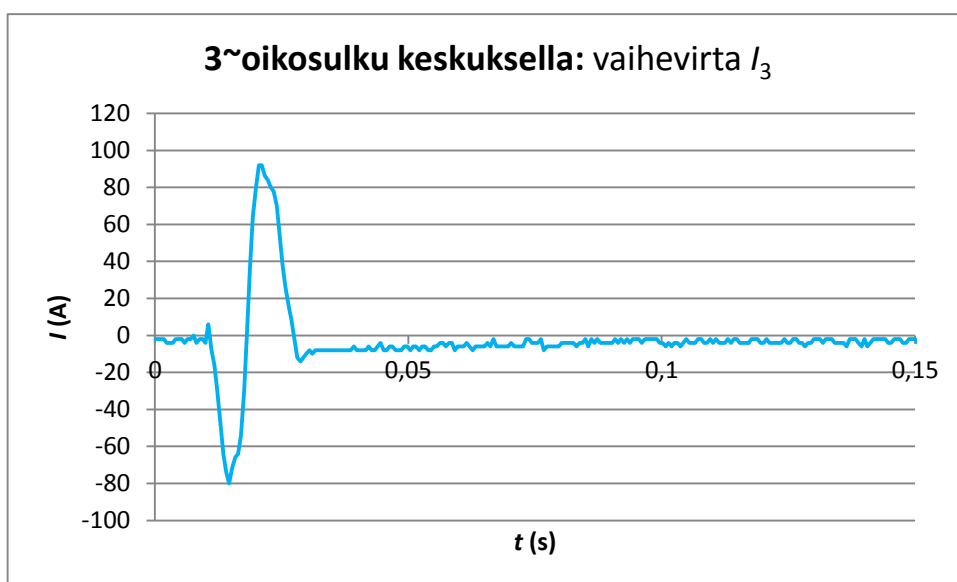
KUVIO 4.7 Vaihejännite U_{v1} , kun keskuksella syntyi kaksivaiheinen oikosulku



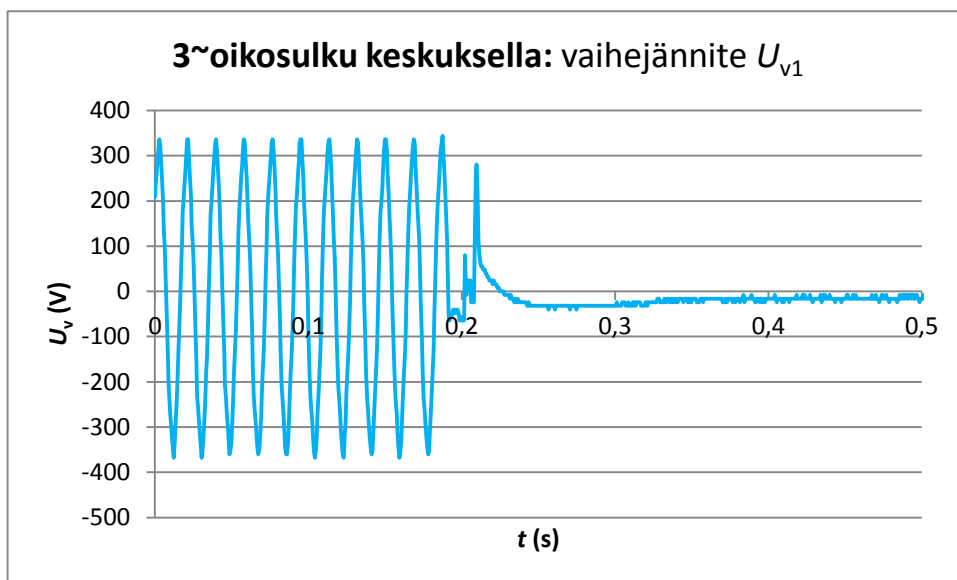
KUVIO 4.8 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun keskuksella syntyi kolmivaiheinen oikosulku



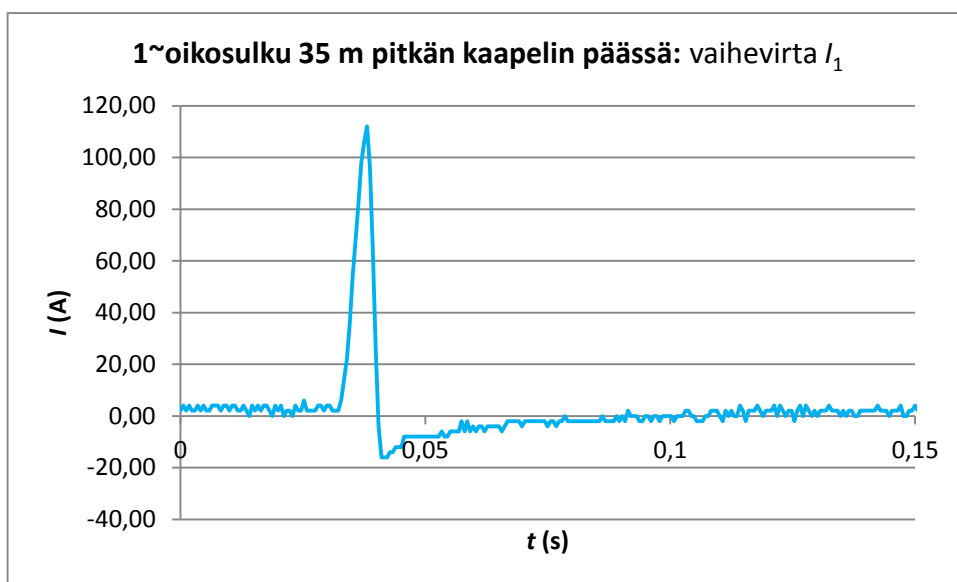
KUVIO 4.9 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_2 , kun keskuksella syntyi kolmivaiheinen oikosulku



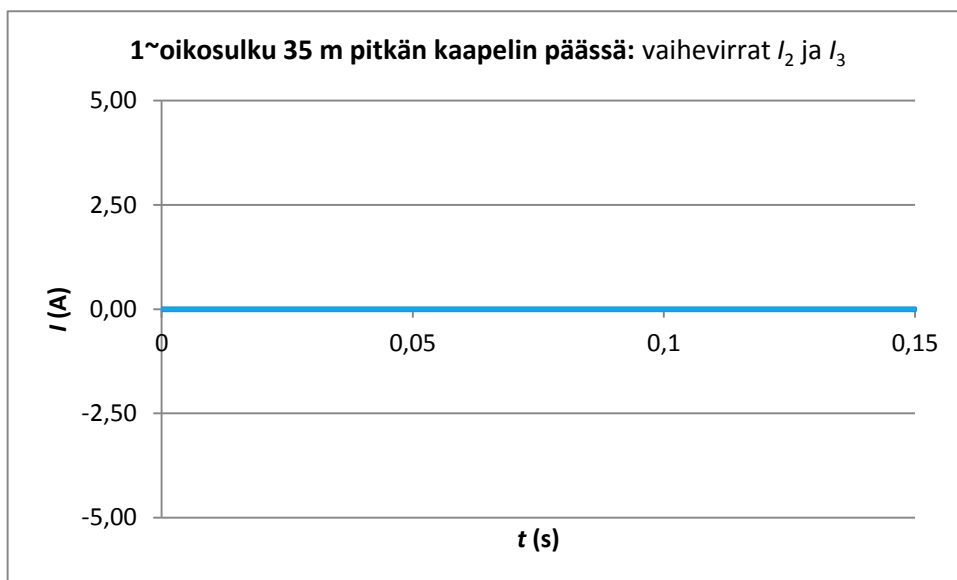
KUVIO 4.10 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_3 , kun keskuksella syntyi kolmivaiheinen oikosulku



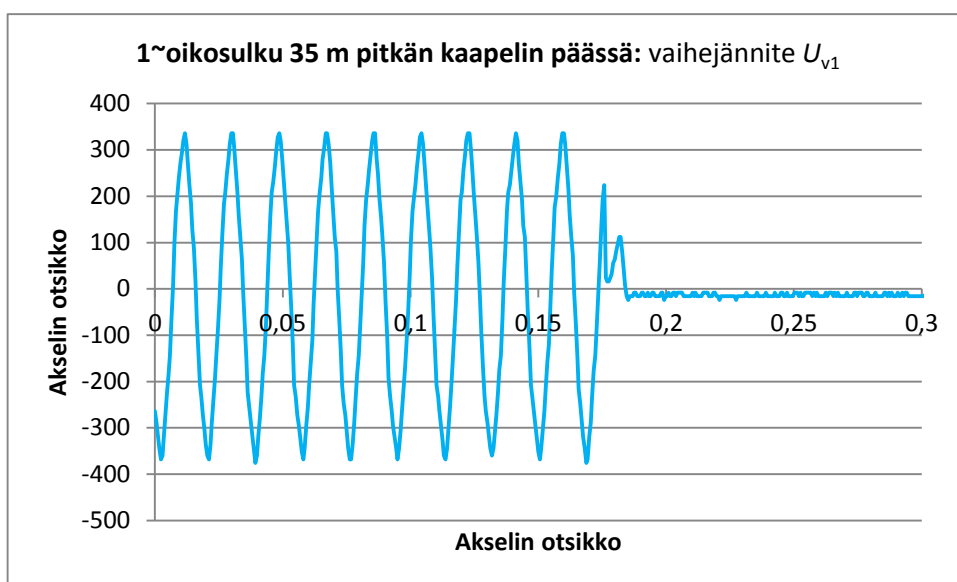
KUVIO 4.11 Vaihejännite U_{v1} , kun keskuksella syntyi kolmivaiheinen oikosulku



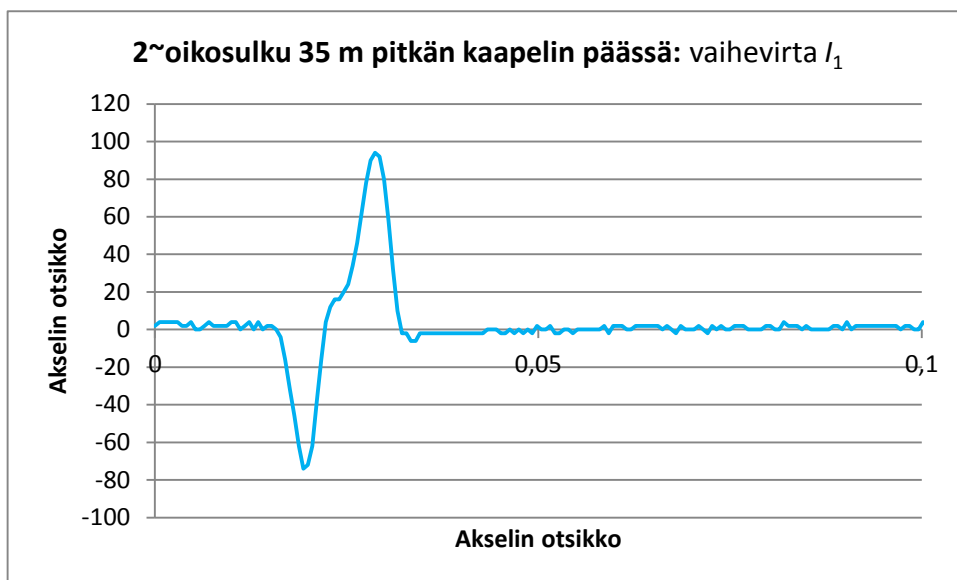
KUVIO 4.12 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi yksivaiheinen oikosulku



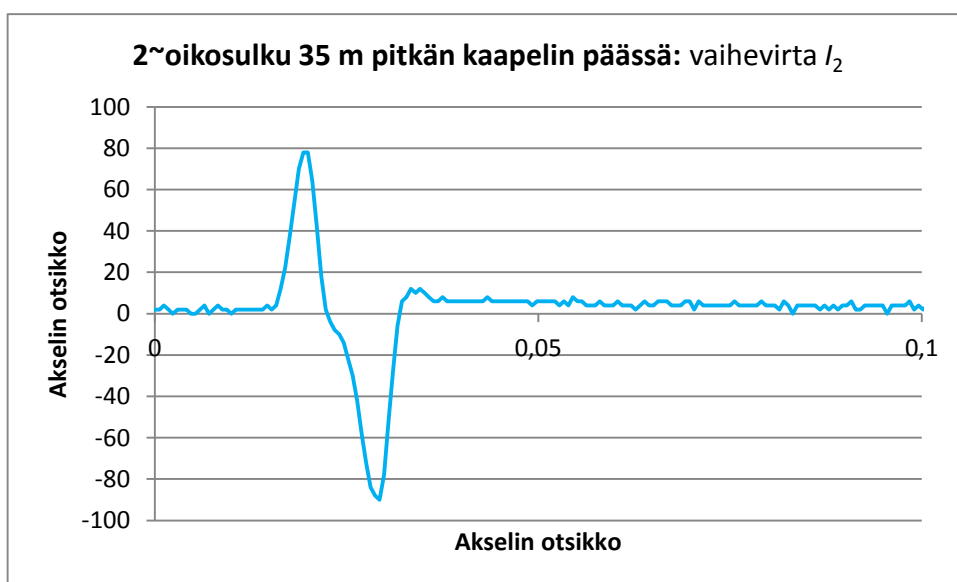
KUVIO 4.13 Varavoimakoneen syöttämät vaihevirrat I_2 ja I_3 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi yksivaiheinen oikosulku



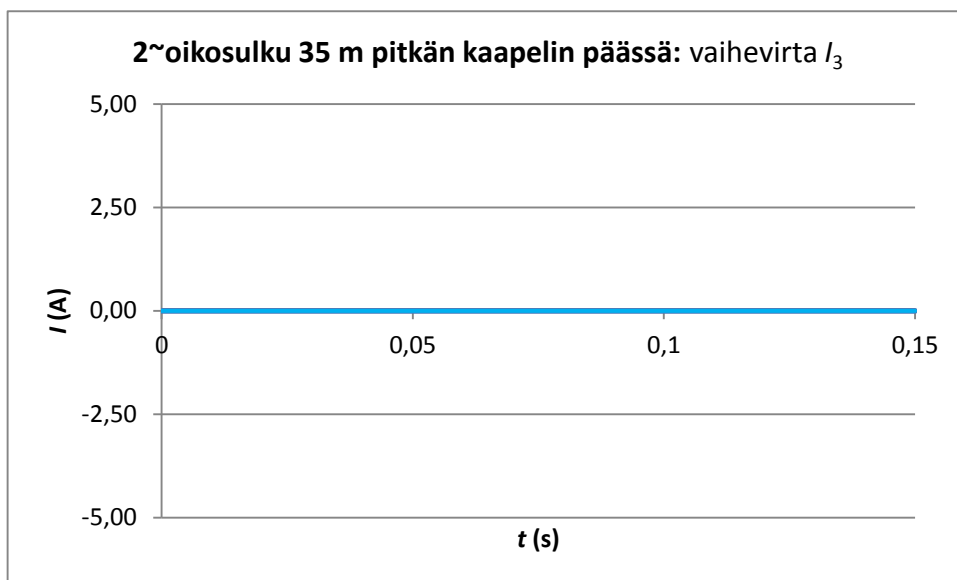
KUVIO 4.14 Vaihejännite U_{v1} , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi yksivaiheinen oikosulku



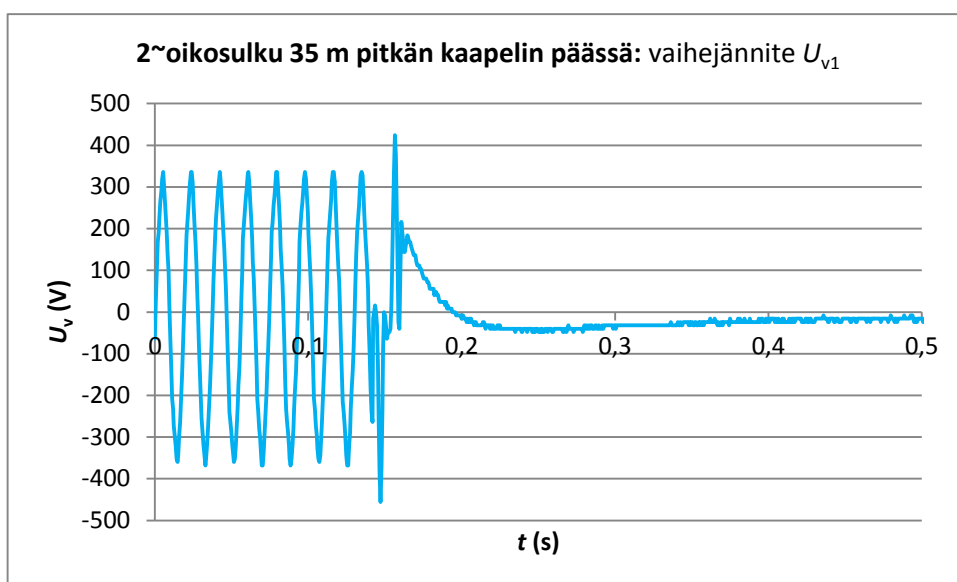
KUVIO 4.15 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kaksivaiheinen oikosulku



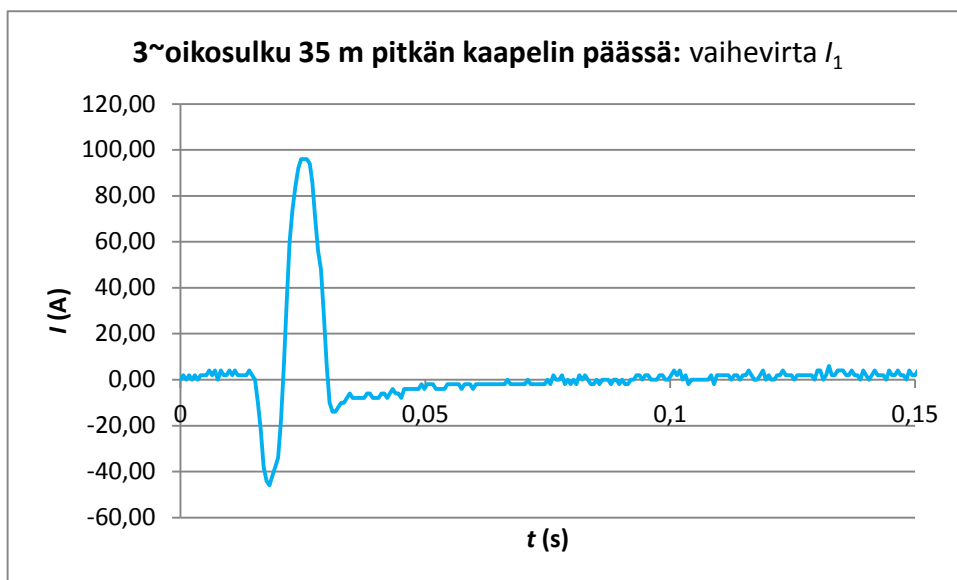
KUVIO 4.16 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_2 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kaksivaiheinen oikosulku



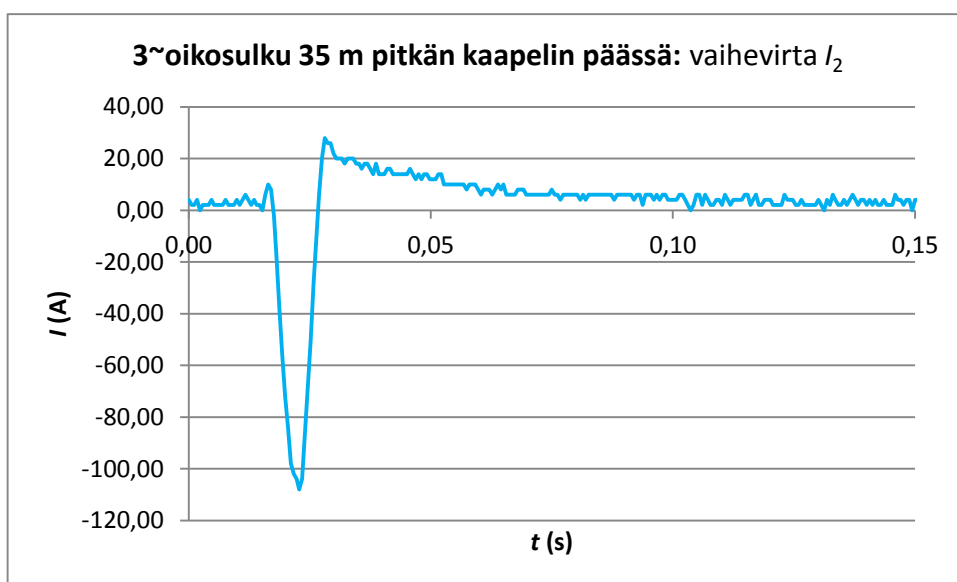
KUVIO 4.17 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_3 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kaksivaiheinen oikosulku



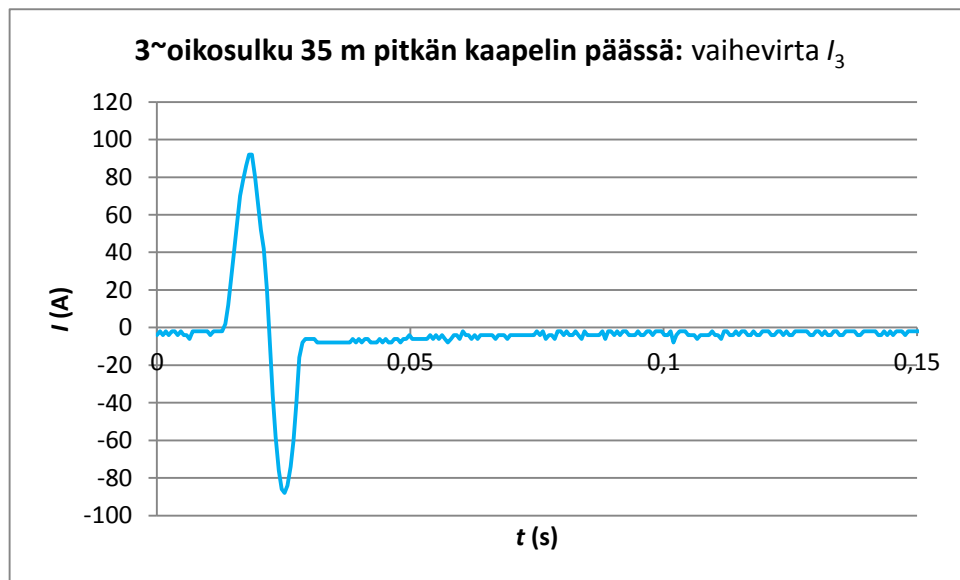
KUVIO 4.18 Vaihejännite U_{v1} , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kaksivaiheinen oikosulku



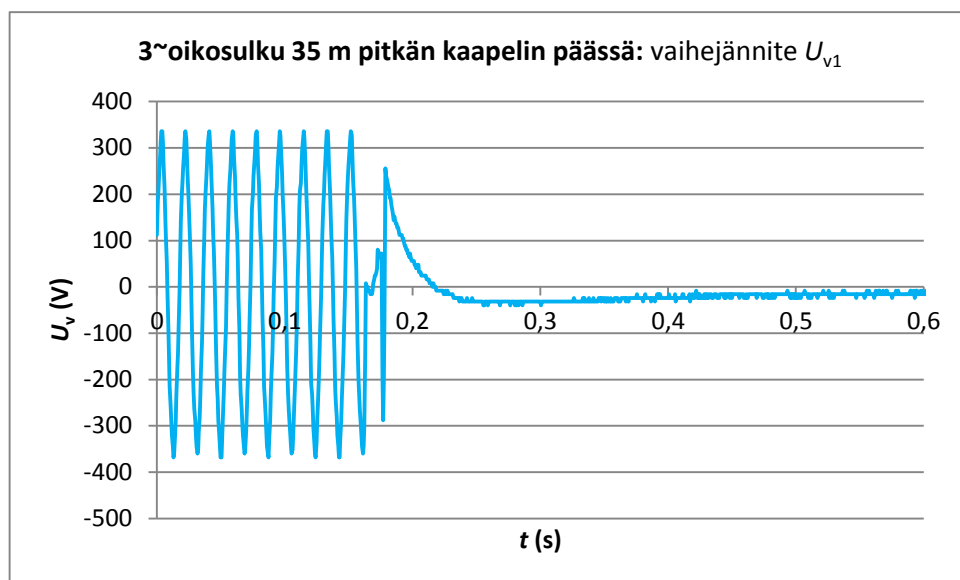
KUVIO 4.19 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_1 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kolmivaiheinen oikosulku



KUVIO 4.20 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_2 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kolmivaiheinen oikosulku

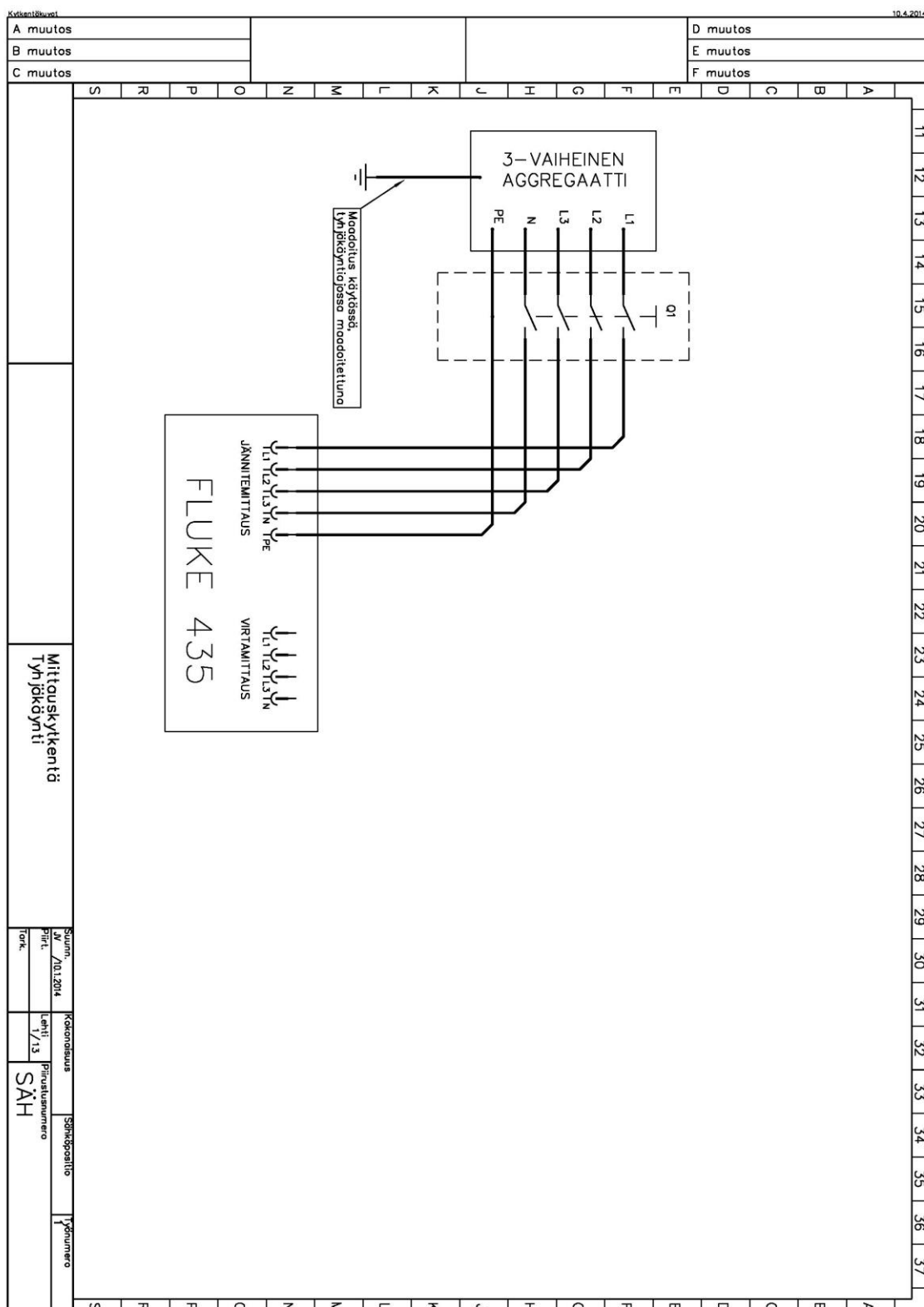


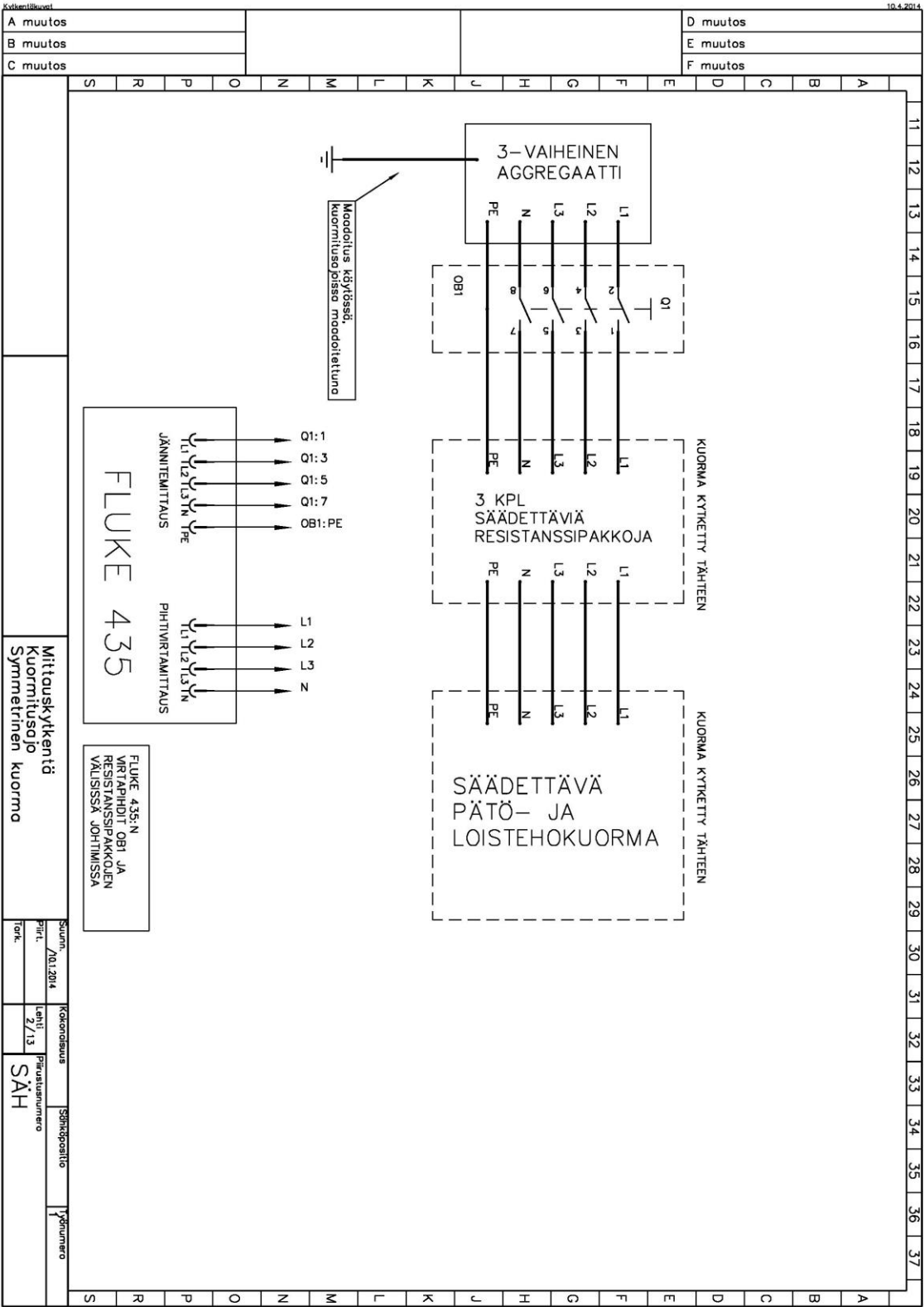
KUVIO 4.21 Varavoimakoneen syöttämä vaihevirta I_3 , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kolmivaiheinen oikosulku

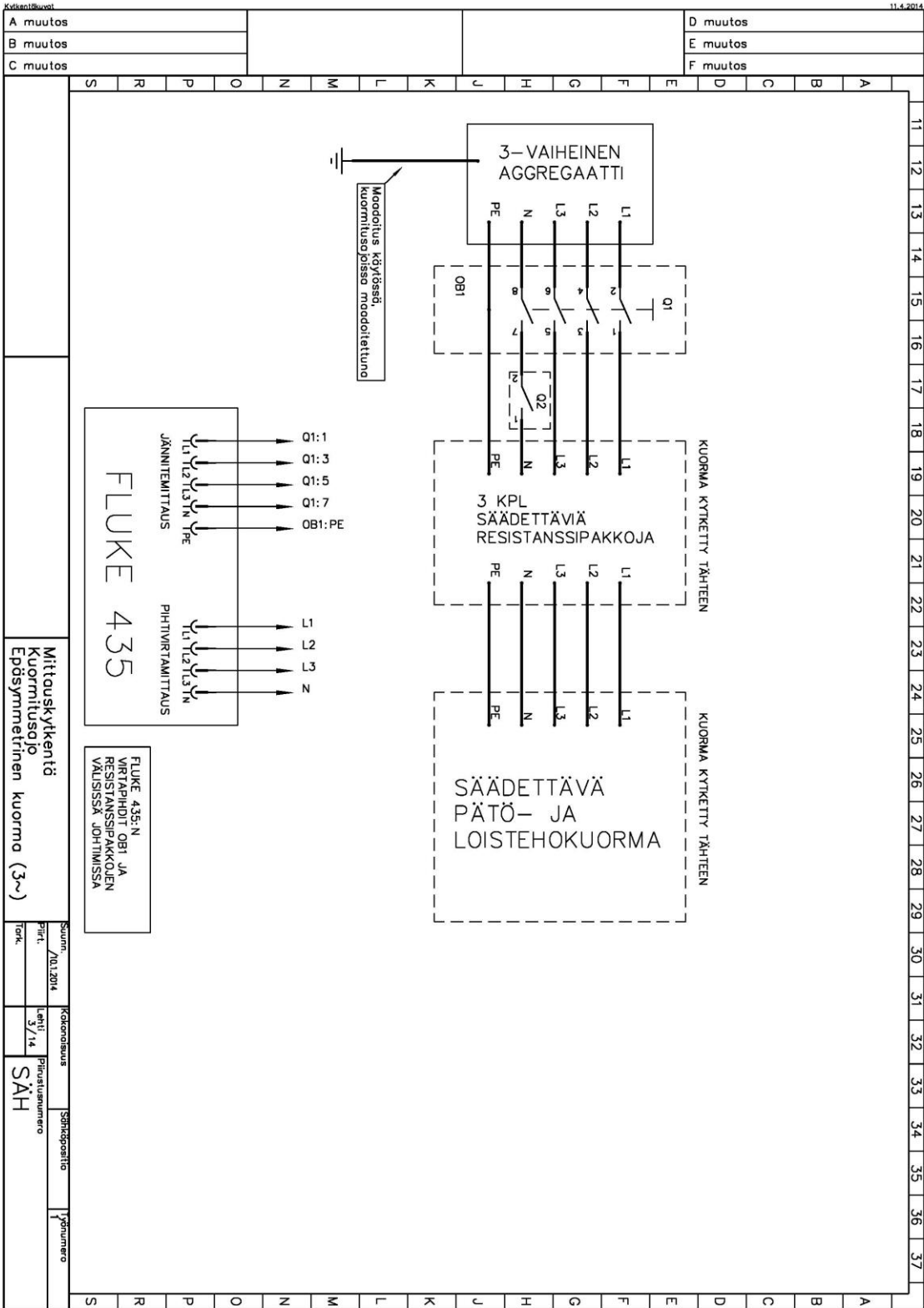


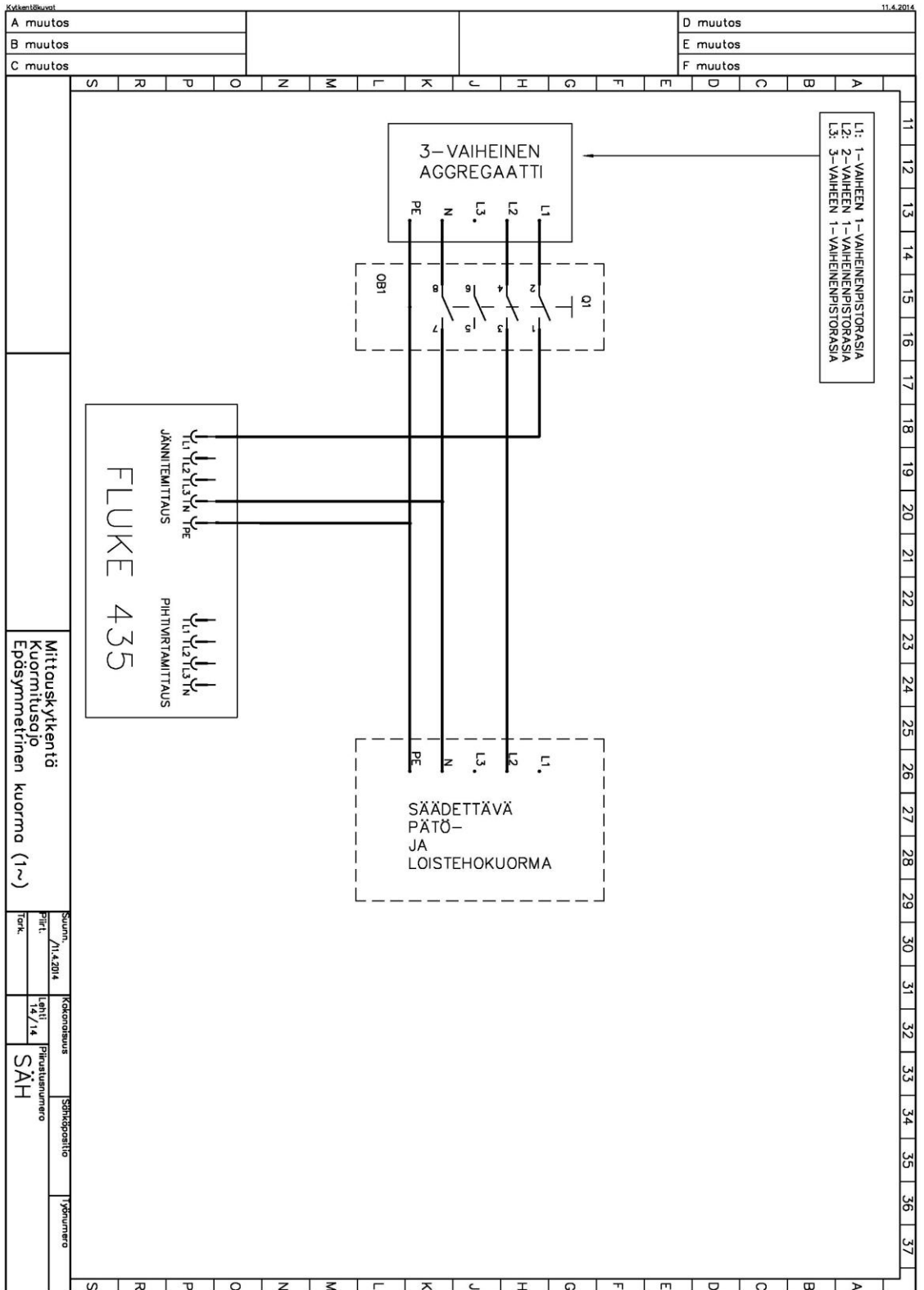
KUVIO 4.22 Vaihejännite U_{v1} , kun 35 m pitkän kaapelin päässä syntyi kolmivaiheinen oikosulku

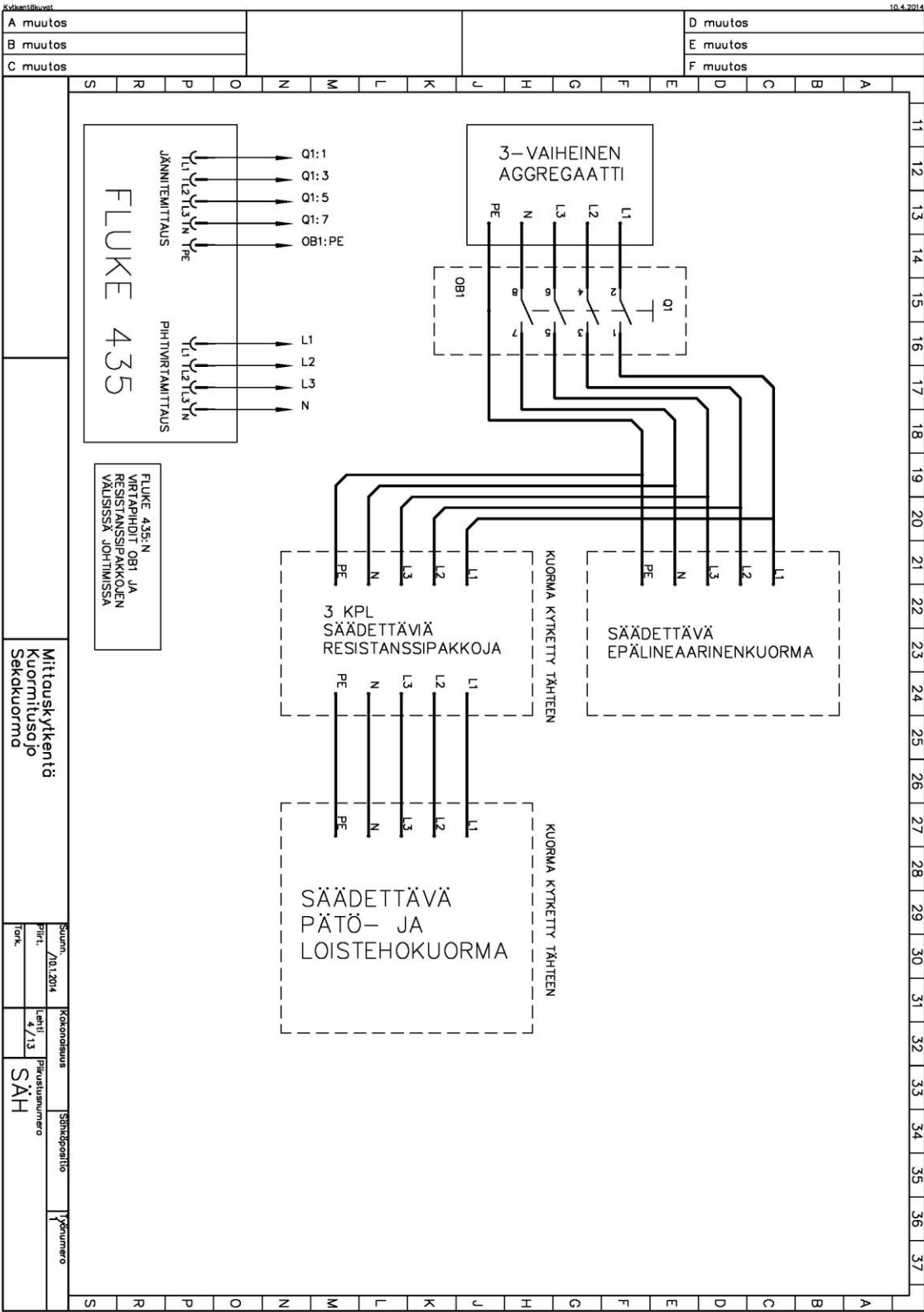
Liite 5. Tyhjäkäynti- ja kuormitusajojen mittauskytkennät

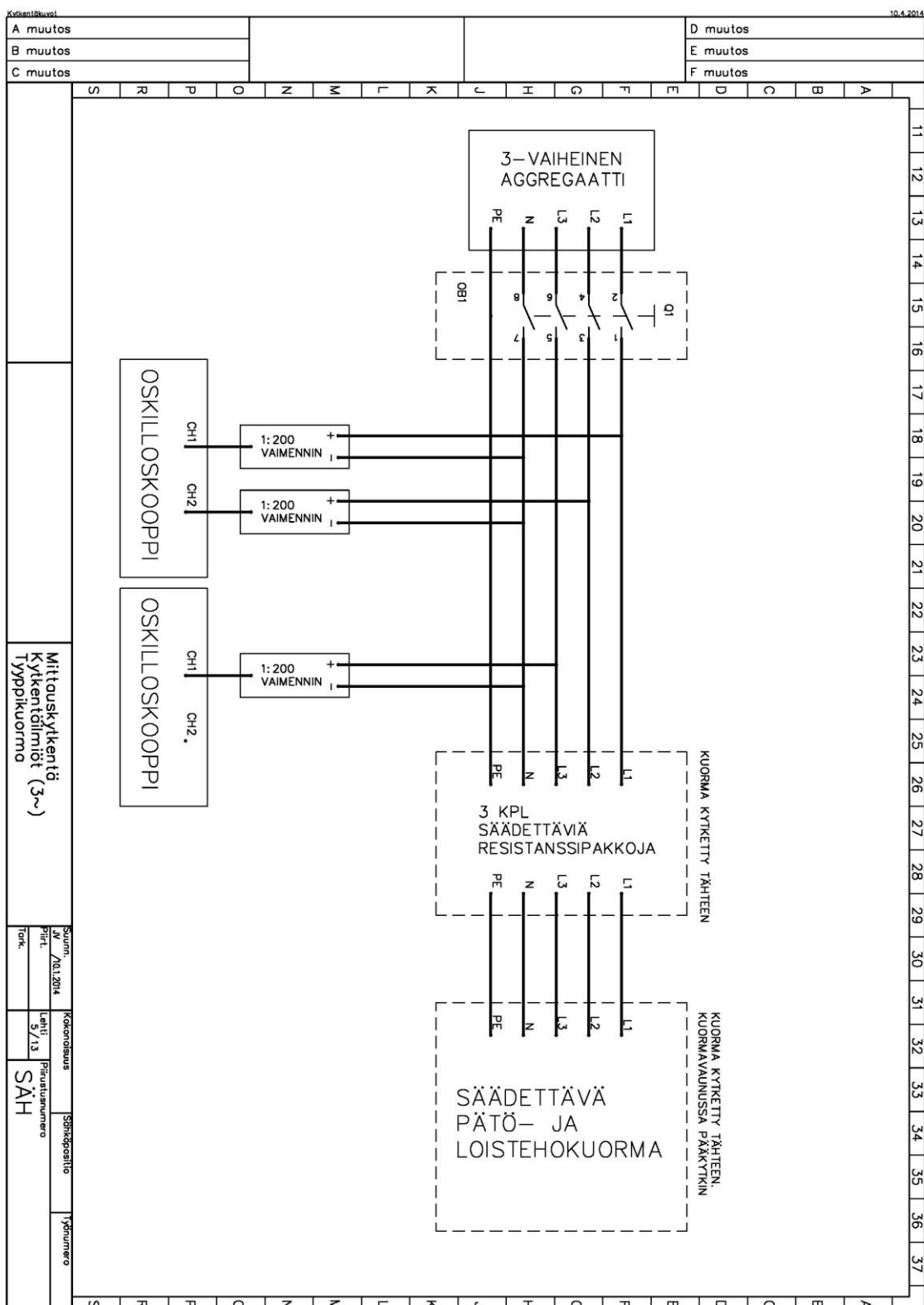


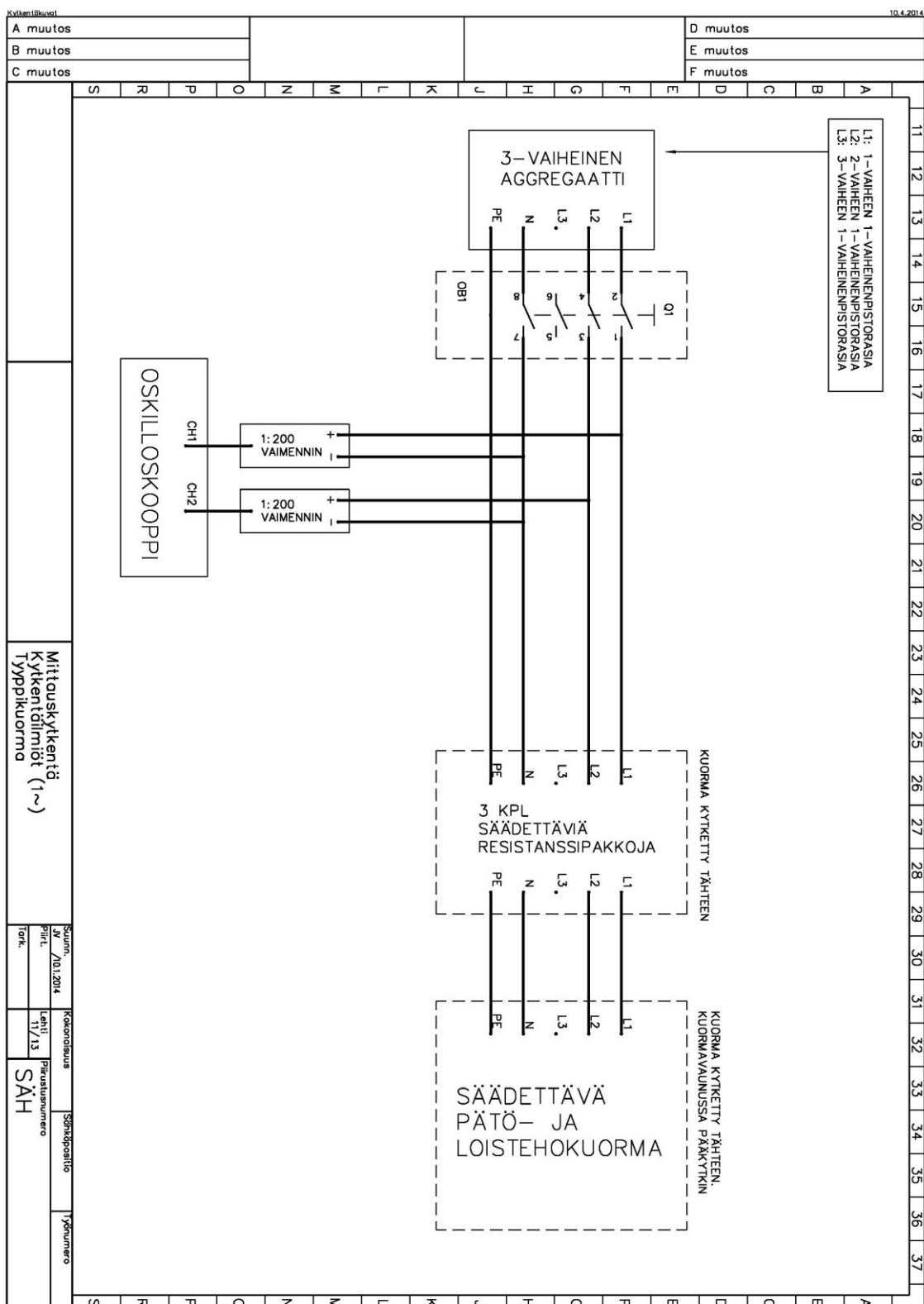


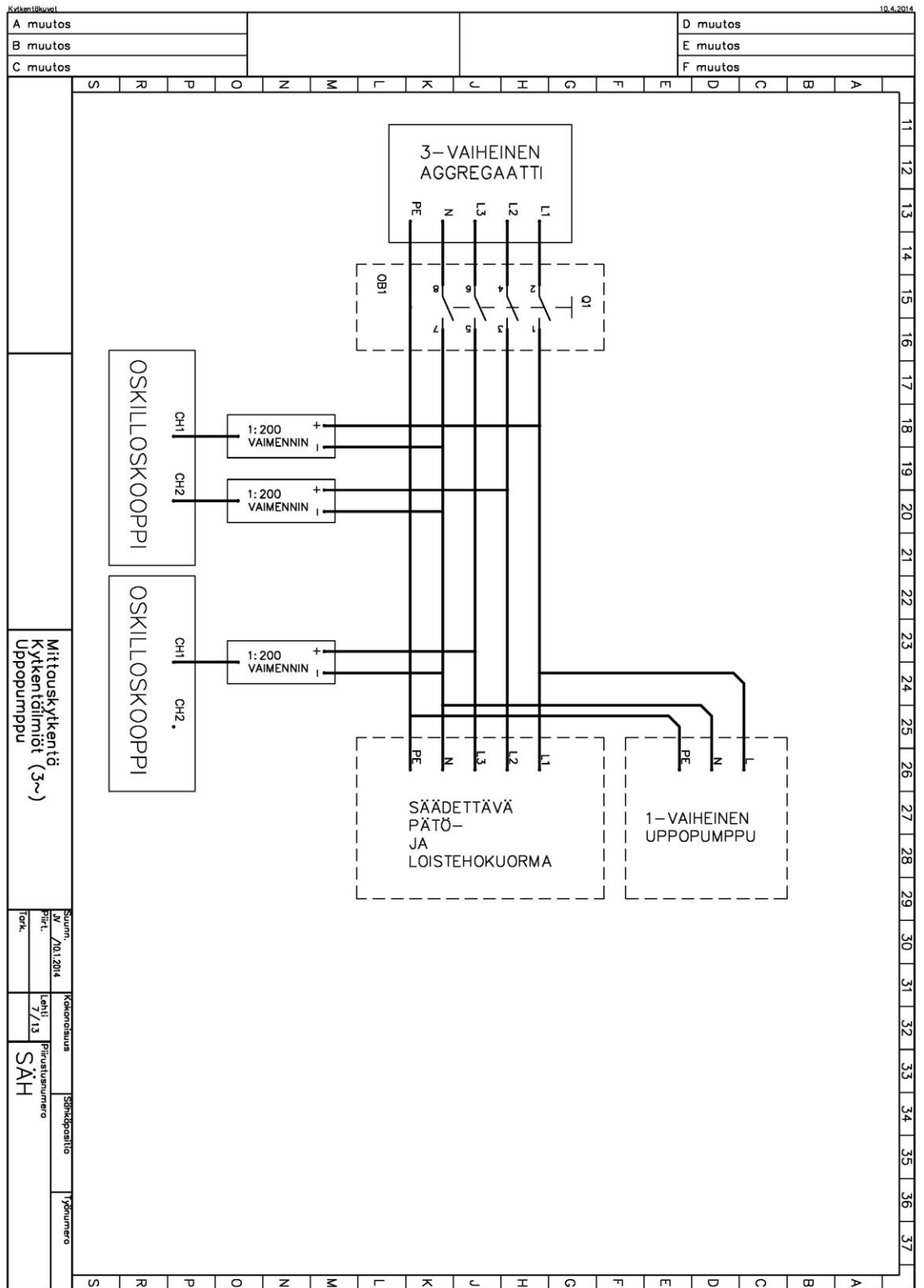


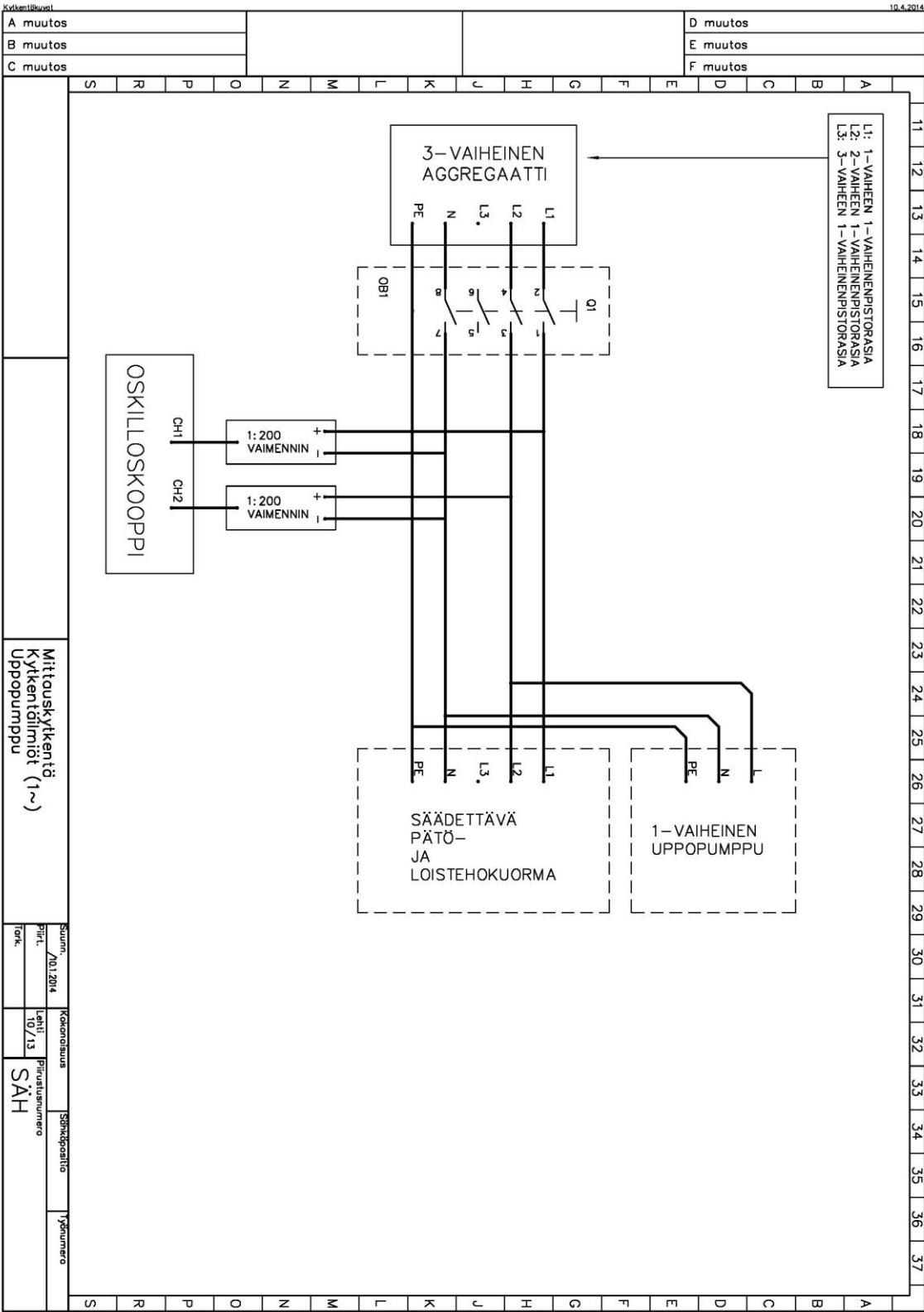


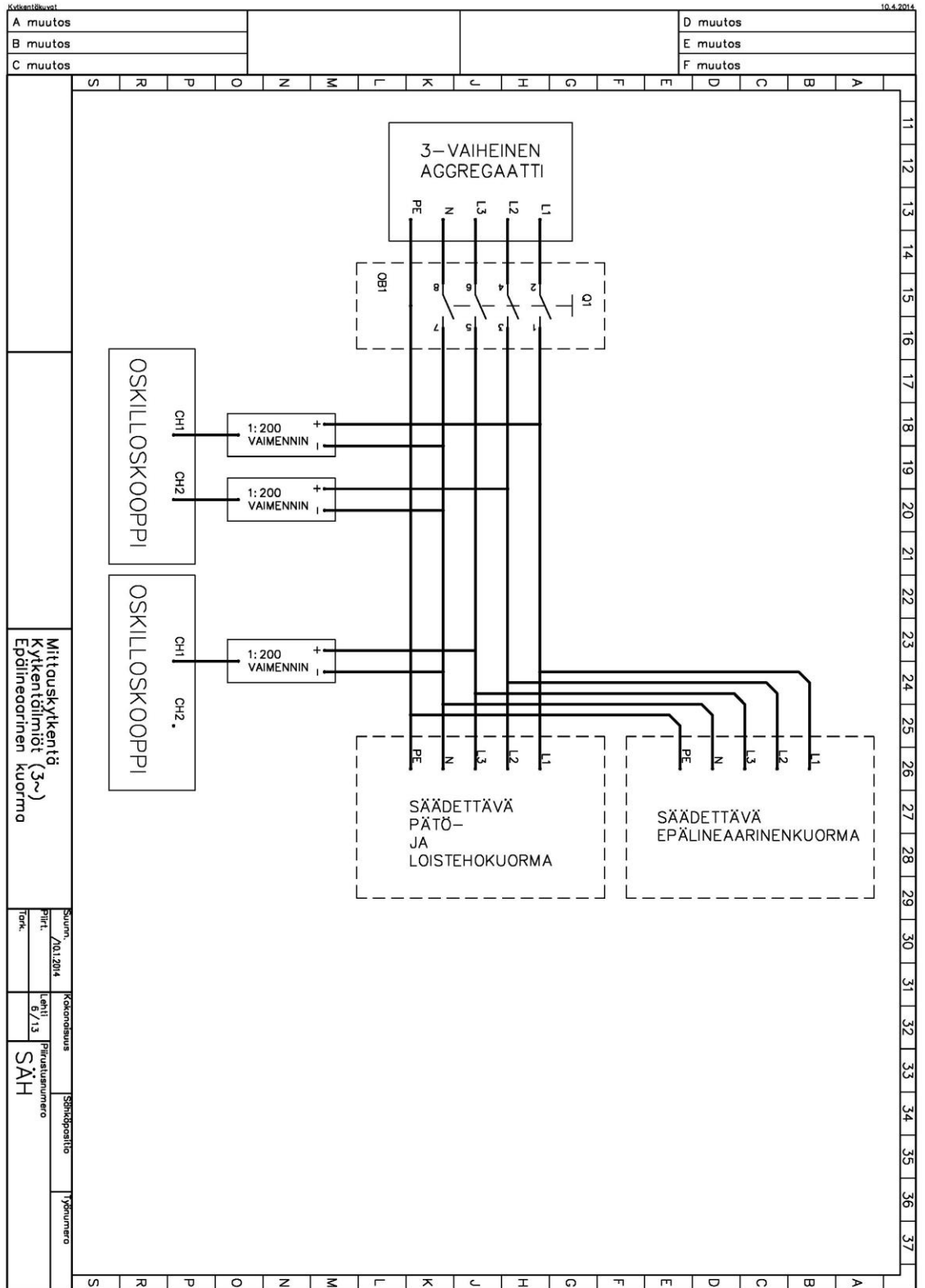


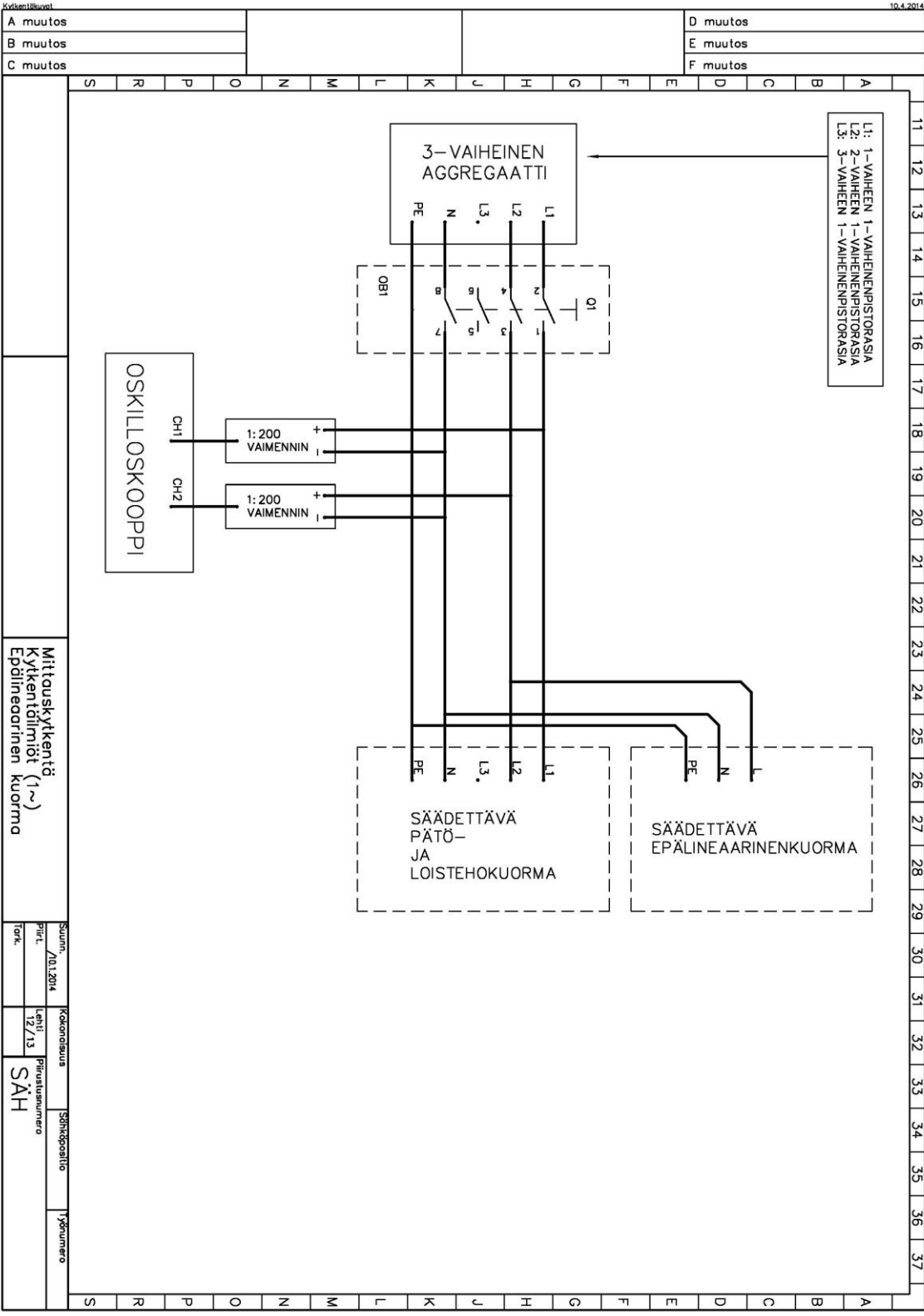


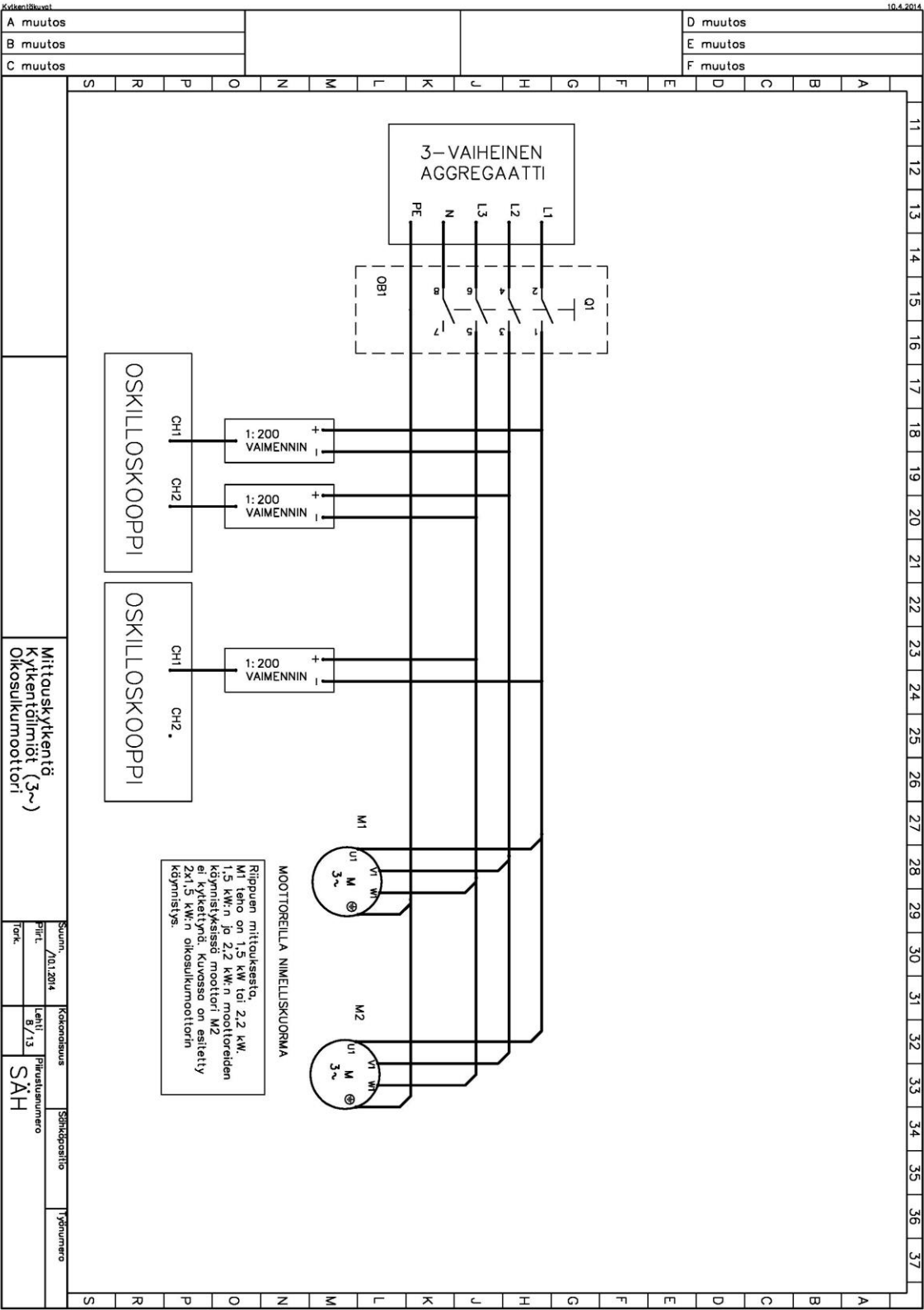












Liite 7. Vikatilanteiden mittauskytkentä

